دراسات

في علاج وصيانة الآثار الحجرية

تأليف

د./إبراهيم محمد عبد الله

المشرف على قسم الترميم

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ وَإِنَّ مِنَ الْحِجَارَةِ لَمَا يَتَفَجَّرُ مِنْهُ الأَنْهَارُ وَإِنَّ مِنْهَا لَمَا يَشَّقَّقُ فَيَخْرُجُ مِنْهُ الْمَاءُ وَإِنَّ مِنْهَا لَمَا يَهْبِطُ مِنْ خَشْيَةِ اللَّهِ وَمَا اللَّهُ بِغَافِلٍ عَمَّا تَعْمَلُونَ (٧٤) ﴾

صدق الله العظيم

سورة البقرة الآية (٧٤)

مقدمة :-

تعتبر الأحجار بأنواعها المختلفة من أكثر المواد الطبيعية التي أستخدمها الإنسان على مدي العصور المختلفة .

فقد تعددت استخداماته لها وكذلك الأغراض فصنع منها أدوات القتال وأوانيه ومنازله وقصوره ومعابده ومقابره وتماثيله وتأثرت أيضا بتطوره الحضاري والتكنولوجي .

ولكثرة استخدامه للأحجار اطلق اسمها على عصوره الأولي وهي العصور الحجرية والتي قسمت إلي العصر الحجري القديم والعصر الحجري الوسيط والعصر الحجري الحديث قبل معرفة الإنسان لكتابة وهي العصور التي يطلق عليها عصور ما قبل التاريخ والتي تنتهي في الألف الرابعة قبل الميلاد وقد ظلت الأحجار مستخدمة خلال العصور التاريخية ليس في مصر وحدها ولكن في كل دول العالم القديم وحفظت لنا التراث الإنساني بكل صوره وإشكاله برغم اختلاف العقائد والديانات واللغات . فقد تعددت إستخداماتها في العمارة والفنون ومازالت مستخدمة حتي اليوم .

ويتناول هذا الكتاب الصخور وكيفية نشأتها وتكوينها وتقسيماتها وأنواعها وهي الصخور النارية والمتحولة والرسوبية وأشهر أنواعها المستخدمة في العمارة والفنون ومكوناتها المعدنية .وأهم محاجرها القديمة وطرق استخراجها والتطور التكنولوجي لعمليات القطع والنحت .

ونظراً لأهمية الأحجار كشواهد تاريخية ودورها في تتبع نشأة الفنون وتطورها وكذلك أشكال العمارة المختلفة التي نفذت بها مما يعدها سجلاً لتطور العلوم والمعارف والديانات القديمة .

وبالرغم من قوتها ومتانتها وصمودها ضد عوامل البيئة المختلفة إلا أنها تتأثر بهذه التغيرات البيئية سواء كانت عوامل فيزيائية وكيميائيـــة وبيولوجيـــة وانطلاقا من قيمتها المختلفة باعتباره شاهدا وسجلاً للتـــراث الإنـــساني وجـــب العناية به والمحافظة عليه لذا فقد تناول الكتاب خواصها المختلفة سواء الخواص الطبيعية والميكانيكية والحرارية وأهم عوامل التلف التي تتعرض لهـــا وذلـــك بهدف التعرف على أهم التقنيات العلمية المستخدمة في علاجها وصيانتها وذلك لتبقي للأجيال القادمة دليلاً على عظمة الأجداد وإسهامهم في الحضارة الإنسانية.

قد إستخدم الحجر بكثرة كمادة للبناء في مصر القديمة وتعدا المباني الحجرية في مصر من أقدم المباني الحجرية في العالم واعظمها ضخامة وقد ازداد إستخدامه بكثرة في العمارة في عهد الأسرة الثالثة خصوصا في مصر السفلي حيث يبلغ أوج العلي في المباني ذات الجمال الفائق في سقارة .

وأهم أنواع الحجر التي إستخدمت في بناء مصر القديمة هو الحجر الجيرى والحجر الرملي و الجرانيت ، بالأضافة إلي إستخدام أحجار أخري فيعصور لاحقة مثل الرخام والالباستر وكذلك إستخدم البازلت والكوارتزيت .

وقبل أن نتكلم عن أنواع هذه الأحجار لابد لنا أولا من التعرف على تكوينات سطح مصر .

يمكن تقسيم مصر من ناحية التضاريس ومظاهر السطح إلي أربعة أقسام :-

(١) وادى النيل والدلتا .

(٢) الصحراء الشرقية .

(٣) الصحراء الغربية .

(٤) شبه جزيرة سيناء .

ووادى النيل والدلتا عبارة عن شق ضيق يخترق مصر من الجنوب ألي الشمال ما بين حلفا والقاهرة أما الدلتا فهى المساحة المنبسطة التي تمتد من نهاية الوادى عند القاهرة حتى سواحل البحر المتوسط وهي سهل عظيم الأتساع وكانت في عصر القديمة (البليوسين) خليجا من خلجان البحر المتوسط واستطاعت لمياه حمل رواسب الحبشة وهي الرواسب الناعمة التي يتكون منها طمي النيل وقد

أخذت هذه الرواسب في التراكم منذ ذلك الوقت حتى الأن ومنهـا تكونـت طبقـة الطمي الرقيقة التي تغطي قاع وادي النيل الحالي وتغطي أرض الدلتا وهى التـي تستغل في لزراعة ويمكن تقسيم وادي النيل بين حلفا والقاهرة الي قسمين كبيرين أولهما القسم الذي يقع إلي الجنوب من ثنية قنا وثانيهما القسم الذي يقع إلي شـمال هذه الثنية أما القسم الأول فيمتد في منطقة تتألف من الحجر الرملي النوبي . أمـا الجزء الذي يقع إلي الشمال من ثنية قنا فيتكون من أحجار جيرية وتبدأ دلتا النيـل عند القاهرة حيث يكون مستوي الأرض أعلا من سطح البحر بمقدار ١٧ متر وعند هذه النقطة تبدأ حافتا الهضبة الشرقية والهضبة الغربية في الابتعاد عـن بعضـها فتتجه حافة الهضبة الشرقية نحو مدينة الإسماعيلية وتتجه حافة الهضـبة الغربيـة نحو الإسكندرية وبذلك تتسع الأرض السهلة التي تتألف منها الدلتا وتشـمل كـل المنطقة الممتدة بين هاتين الحافتين وبين مياه البحر وهي منطقة مثلثة الشكل حيث يبلغ عرضها ٢٠٠ كم عند ساحل البحر المتوسط أما طولها من القاهرة حتي البحر فيبلغ ٢٠٠ كم ويجري في الدلتا فرعا رشيد ودمياط .

وتشغل الصحراء الشرقية المنطقة الممتدة بين وادي النيل من جهة وبـين البحر الأحمر وخليل السويس من جهة أخري وانحدارها العام من الشـرق حيـث تشرف على ساحل البحر الأحمر بارتفاع عظيم يتراوح مـن ١٥٠٠ م و ٢٠٠٠ م إلي الغرب حيث تشرف على وادي النيل بحافة تتراوح بين ٢٠٠ و ٤٠٠ متر فوق مستوي البحر والأجزاء الشرقية من هذه الهضبة تألف من صخور نارية ومتحولة وهي صخور عظيمة الصلابة لم تقدر عوامل التعرية المختلفة على نحتها ولهـذا كونت جبالا عظيمة الارتفاع يحف بهذه الكتلة النارية من ناحية الغرب شريط من الحجز الرملي النوبي وتمتاز صخوره بسهولة التأكل وقد استطاعت التعرية النهرية أن تكون في جزئه الشمالي و وادي قنا المشهور وهو وادي يمتد من الشمال إلـي الجنوب في اتجاه عكس اتجاه النيل ويتصل بوادي النيل عند ثنية قنا وإلي الغـرب من تكوينات الحجر الرملي النوبي تمتد مساحة واسـعة مـن الحجـر الجيـري

الايوسيني تشغل المنطقة الواقعة بين وادي النيل ووادي قنا وتمتد هذه التكوينات شملا حتى امتداد الطريق بين السويس والقاهرة وعلى هذا يقتصر وجود التكوينات الجيرية علي النصف الشمالي من الصحراء الشرقية .

وتتجه الانحدار العام لهذه الصحراء من الشرق إلي الغرب فإن الإودية تجري في نفس الاتجاه نحو وادي النيل ولكن يلاحظ وجود انحدار أخر للصحراء الشرقية نحو البحر الأحمر تجري فيها أودية قصيرة .

أما الصحراء الغربية فهي تمتد من وادي النيل حتى الحدود الغربية لمصر ومن البحر المتوسط شمالا إلي حدود السودان جنوبا وتبلغ مساحتها ثلثي مساحة مصر وهي عبارة عن هضبة صحراوية متسعة ذات ارتفاع معتدل يقل عن ارتفاع الهضبة الشرقية ويبلغ المتوسط ٤٠٠ م فوق متوسط سطح البحر وهي تحوي العديد من المنخفضات وأهمها منخفض وادي النطروان ويلاحظ أن الهضبة الغربية تحوي جهات عظيمة الارتفاع مثل منطقة العوينات التي تقع جنوب غربي مصر وتتألف هذه المنطقة من تكوينات نارية وإلي الشمال الشرقي من منطقة العوينات توجد منطقة أخري عظيمة الارتفاع تعرف باسم الجولف الكبير وتتألف من أحجار من الخرسان النوبي ونظرا لاختلاف التكوينات التي تتكون منها الهضبة الغربية وهي منطقة الحجر النوبي في جنوب الهضبة وتنحدر من الجنوب إلي الشمال وتنتهي في منخفض الواحة الداخلة والخارجة حتي نري نهاية تكوينات الحجر الجيري التي تمتد عند الهضبة الشمالية لتكوينات الخرسان النوبي التي تهبط من مستوى ٨٠٠ الي ١٠٠م في الشمال .

أما منطقة الحجر الايوسينى فهي تمتد غربى النيل وتشرف نحية لجنوب علي منخفض لداخلة والخارجة وتعلو عن بنحو ٣٠٠م ثم تنحدر نحو الشمال حتى تنتهى عند منخفض سيوة والقطاره ويكون مستوها قد هبط إلي مستوى البحر تقريب وفي هذا الجزء يوجد منخفض الفرافرة والبحرية والفيوم .

اما منطقة الحجر الجيرى اليوسيني فهى تمتد من المنخفض التى تشغله سيوة والقطارة في الجنوب حيث تشرف عليه بحائط مرتفع يبلغ ٢٠٠م تقريبا إلى البحر المتوسط في الشمال وتنحدر نحو البحر إنحدار تدريجي حتى يصل إلى مستواه ٥٠ أو ٦٠ م فوق مستوى البحر بالقرب من المنطقة الساحلية وفي هذه المناطق الثلاث نلاحظ أن انحدار الارضي تدريجي من الجنوب إلي الشمال فمنطقة الحجر الرملي النوبي تهبط من ارتفاع ٨٠٠م في الجنوب إلي ١٠٠ م في الشمال وهضبة الحجر الجيري الايوسيني تهبط من ارتفاع ٤٠٠م في الجنوب إلي مستوي ٥٠ أو ٦٠ م في الشمال .

أما شبه جزيرة سيناء فهي عبارة عن هضبة انكسارية مثلثة الشكل تقع شمال شرقي مصر رأسها في الجنوب ويحاورها خليجا العقبة والسويس من الشرق والغرب وقاعدتها في الشمال تطل على البحر المتوسط وهي قطعة من قارة أسيا تتبع سياسيا مصر وتضاريسها تقسم إلي ثلاثة أقسام .

القسم الأول الجنوبي عبارة عن منطقة صلبة وعرة تتكون من صخور نارية ومتحولة ويتعبر هذا الجزء مكملا للكتلة النارية الممتدة في شرق الصحراء الشرقية وبها قمم عالية اهمها جبل كاترينا ٢٦٤٠م وجبل موسي ٢٢٨٠ م وبها وأودية كثيرة . أم القسم الأوسط يعرف بهضبة التية ويبلغ مستوي ارتفاع الهضبة ٨٠٠ م ويلاحظ انها تنحدر تدريجيا نحو الشمال ويمكن اعتبرها مكملا لهضبة الحجر الجيري الايوسيني التي تشغل جزءا كبيرا من هضبة الصحراء الشرقية و لا يفصها عنها إلا خليج السويس وبها أودية أهمها وادي العريش . أما القسم الشمالي وهو ينحصر بين هضبة التية في الجنوب والبحر المتوسط في الشمال وهو عبارة عن منطقة سهلة تمتد على طول ساحل البحر المتوسط من الشرق إلي الغرب على شكل ممر يصل أفريقيا وأسيا ويتكون هذا الممر من صخور جيرية تابعة لعصر البليوسين يعلوها عدد من الكثبان الرملية.

الصخور

تعتبر الصخور أكثر المواد أنتشاراً علي سطح القشرة الأرضية وتظهر الصخور بأشكال وأنواع مختلفة ومعقدة للناظر فقد تظهر الصخور في صورة طبقات رقيقة لها ألوان مختلفة وأبعاد مختلفة وهذه الطبقات تكون أما ذات أتجاه أفقي أو مائلة بزاوية معينة أو متعامدة وقد تظهر في صورة كتلية ذات تكاوين أفقية أو مائلة ممتدة لعشرات الكيلومترات.

هذه الأنواع المختلفة علمة يمكن تقسيمها إلي ثلاثة أنواع رئيسية تبعاً لأصل تكوينها ونشأتها إلي الصخور النارية Igneous rocks والصخور الرسوبية Sedimentary rocks والصخور المتحولة metamorphic rocks.

هناك علاقة وثيقة بين كل من الصخور الرسوبية والصخور النارية والصخور المتحولة فمع مرور الزمن والظروف الطبيعية المختلفة فإن أي من هذه الصخور قد يتحول إلي نوع أخر وهذه العلاقة يمكن تسميتها بدوره الصخر ويمكن الأشارة إليها كما يلي:-

١. الصخور النارية سواء تكونت عن طريق برودة اللافا علي جانبي البراكين أو سيرها لمسافات بعيده عن فوهه البركان وبرودتها بسرعة وتجمدها في صورة كتل صخرية.

أو تكون الصخور النارية تحت سطح القشرة الأرضية ثم ظهور مكاشفها علي السطح كنتيجة طبيعية لعوامل جيولوجية معينة أو عوامل التجوية المختلفة.

٢. تتخلق نواتج عمليات التجوية من الصخور المختلفة سواء الصخور النارية أو الرسوبية أو المتحولة.

٣. الرياح والمياه الجارية والثلاجات تقوم بتحريك المواد من مكان إلي آخر وفي الدوره النموذجية فإن هذه المواد تصل إلي قاع المحيطات حيث تتكون طبقات من نواتج التجوية في صورة طمي ورمال وحصى صخري حيث تتلاحم هذه النواتج وتكون الصخور الرسوبية.

وهذه الصخور إذا كانت مدفونة علي أعماق كبيرة من سطح الأرض فإنها تتعرض لظروف من الضغوط ودرجات الحرارة العالية والتي يدورها تستجيب لها الصخور الرسوبية مكونة الصخور المتحولة.

٤. إذا أستمر تعرض هذه الصخور الجديدة (المتحولة) لظروف من الضغط والحرارة العالية المتزايدة فإنها تتصهر وتتحول إلي ماجما والتي تبرد بدورها مكونة الصخور النارية مرة أخرى وبذلك نحصل علي دوره كاملة ويتضح من خلال هذه الدوره أن هناك علاقة وثيقة بين أنواع الصخور المختلفة. فالزمن والظروف المتغيرة كفيل بأن يجعل أي من هذه الصخور يتحول إلي الأخر.

وهذه الدوره الكاملة قد تتوقف في بعض أجزائها فربما لا تصل الصخور النارية المتكونة في الأعماق إلي السطح وبالتالي لا تتحول إلي رواسب بواسطة عمليات التجوية وبدلاً من ذلك فقد تتعرض إلي ضغط عالي ودرجة حرارة شديدة وتتحول مباشرة إلي الصخور المتحولة دون المرور بمرحلة تكون الصخور الرسوبية وهكذا.

أولاً : الصخور النارية

هذه الصخور تعتبر أصل الأنواع المختلفة من الصخور وتكوينها سابقة لهذه الأنواع وتتكون نتيجة لبرودة الماجما المنصهرة الساخنة magma المتواجدة في حجره الماجما بباطن الأرض ويتم تكوينها أما علي أعماق كبيرة

الأرض مكونة صخور ذات بلورات كبيرة الحجم أو تتكون قريباً من السطح أو عليه مكونة صخوراً ذات بلورات صغيرة أو دقيقة الحجم.

التركيب المعدني للصخور النارية Mineralogical composition rocks of Igneous تنقسم المعادن المكونة للصخور النارية إلى نوعين أساسيين وهما المعادن الأساسية Essential Minerals والمعادن الأضافية Secondary Minerals فالمعادن الأساسية هي المتواجدة في الصخوربكميات كبيرة ويتوقف عليها خواص الصخر وأسمه وتشمل معادن الفلسبارات Feldspars ، البيروكسينات Pyroxenes ، الميكا Mica والفلسباثويدات ، لوسيت Leucite، نيفلين **Nepheline**، والأولفين والكوارتز quarts.

أما المعادن الإضافية فهي المعادن التي تتواجد بكميات صغيرة في هذه الصخور ومن أمثلتها الماجنتيت ، الألمينيت ، الأباتيت ، الزركون ، الأسفين ، الروتيل.

ويتم تبلور المعادن تبعاً لنظام معين تتبلور أولاً المعادن الاضافية ثم يتبعها في التبلور المعادن الحديد و مغنيسية مثل الأولفين والبروكسينات والأمفيبولات ثم يتبلور بعد ذلك معادن الفلسبارات البلاجيوكليزية والبوتاسية ثم الكوارتز.

وتبعاً لنظام التبلور فإن المعادن الفقيرة في السليكا (القاعدية) تترسب أولاً عند درجات حرارة أعلى من ١٠٠٠م تقريباً (حيث هي أقل المعادن ذوباناً) ويتبقي من الصهير المجماني الأولي ماجما لها تركيب مختلف عن هذا الصهير الأولي ومنها يمكن أمر تتكون الصخور المتوسطة وبعد تكون هذه الصخور تتبقي ماجما مختلفة عن الماجما السابقة حيث تتكون منها الصخور الحامضية

(غنية بالسليكا) عند درجات حرارة بين ٦٠٠ – ٩٠٠ْ تقريباً ويمثل التخطيط التالي نظام التبلور التفارقي Crystallization Differentiation

التركيب الكيميائي للصخور النارية Chemical composition of Igneous Rocks بصفة عامة فإن التركيب المعدني الناري يتوقف على التركيب الكيميائي للماجما المتكونة منها فإذا كان الصهير المجماتي غني بالسليكا فإن الصخور الناتجة تكون غنية بمعادن السليكا مثل الكوارتز وأن كانت فقيرة في معادن السليكا فإن الصخور الناتجة تحتوى علي معادن فقيرة في السليكا ونتيجة لهذا تم استخدام نسبة السليكون كأساس لتصنيف الصخور النارية كيميائياً كما يلي:–

(١) صخور حامضية Acid rocks

وتحتوى هذه الصخور علي نسبة عالية من السليكا أكثر من ٦٥% (٦٥% – ٨٠%) في حين تكون نسبة الحديد والمغنسيوم صغيرة لذا ترى لون هذه الصخور فاتح وتحتوى علي معادن الأورثوكليز والميكروكلين والبلاجيوكليز والكوارتز بكثرة بينما تقل نسبة المعادن الحديد ومغنيسية (مثل البيوتيت) من أمثلتها الجرانيت والجرانوديوريت والتلسيت والريولايت.

(٢) صخور متوسطة intermediate rocks

وتصل فيها نسبة السليكا من ٥٢% إلي ٦٥% لذا تبدو باللون (أغمق من الصخور الحامضية) في حين تكون نسبة الحديد و المغنسيوم متوسطة. ومن أمثلتها الديوريت والتركيت والاندبيسيت.

(٣) صخور قاعدية Basic rocks

وتكون بها نسبة السليكا أقل من ٥٢% ونسب الحديد والمغنيسيوم أعلي من النسب السابقة ولونها داكن يميل إلي السواد وتحتوى علي معادن حديد ومغنسين بكثرة وكذلك البلاجيوكليزات الكلسين بنسبة متوسطة. ومن أمثلتها الجابرو والبازلت والدولوريكا.

اللون

مما سبق يتبين لنا أن لون الصخر الناري مرتبط بتركيبه الكيميائي والمعدني. ويمكننا التفرقة بين الصخور النارية إلي صخور فاتحة اللون (الحمضية) وصخور قاتمة اللون (قاعدية) وصخور متوسطة اللون (متوسطة).

النسيج Texture

تختلف الصخور النارية من ناحية تركيبها المعدني والكيميائي وتختلف في نفس الوقت بالنسبة لأحجار البلورات وأشكالها وترتيبها وعلاقاتها البلورية (بين البلورات أو الحبيبات) وهو ما يطلق عليه اسم النسيج. أي أن كلمة نسيج تطلق علي الحجم النسبي لبلورات المعادن المكونة للصخر وشكلها وطريقة ترتيبها.

ويختلف شكل النسيج حسب سرعة التبريد للمجما، فالصخور الجوفية (تكونت بعيداً عن سطح الأرض) بردت ببطء شديد يسمح بنمو البلورات وكبر حجمها أثناء عملية تكون هذه الصخور من الصهير المجماتي.

وينتج عن هذه الظروف تكون صخور لها نسيج خشن Coarse texture يمكن رؤية مكوناته المعدنية وتمييزها بالعين المجردة وتعرف هذه الصخور بالصخور الجوفية Plutonic rocks أما إذا تصاعدت الماجما من باطن الأرض مكونة صخور علي سطح القشرة الأرضية فإنها تعرف عند ذلك

بأسم اللافا. وهذه اللافا تبرد بسرعة وتكون صخور لا تجد فيها البلورات الفرصة للنمو ولها نسيج دقيق الحبيبات Fine texture تستطيع رؤية هذه البلورات تسطيع رؤية هذه البلورات عن طريق العدسة المكبرة.

وأحياناً لايمكن تمييز البلورات إلا باستخدام الميكروسكوب ويسمي نسيج الصخر الناري في هذه الحالة باسم النسيج مجهري التبلور Micro crystalline texture. وهناك بعض الحالات لا يمكن رؤية النسيج إلا بأستخدام الميكروسكوب المستقطب Polarizing Microscope ويسمي النسيج في هذه الحالة خض التبلور Cryptocrystalline ويسمي النسيج في هذه الأنسجة السابقة في أن بلوراتها متساوية تقريباً في الحجم Even grained.

وهناك بعض أنواع الأنسجة الرئيسية سوف نحاول أن نوردها بأيجاز كما يلي:-

١- النسيج البورفيري أو السماقي Porphyritic texture

هذا النسيج مميز للصخور تحت السطحية Hypabyssal وفي هذا النوع نجد عدد من البلورات الكبيرة موزعة في أرضية Groundmass مكونة من بلورات أكثر دقة بالنسبة لحجم البلورات الكبيرة التي يطلق عليها phenocrysts.

٢- النسيج الزجاجي Glassy texture

ويظهر في الصخور البركانية حيث لا تظهر به بلورات نهائياً وذلك لبرودة اللافا وتجمدها بسرعة لم تسمح بتكوين البلورات.

٣- النسيج الفقاعي Vesicular texture

في الطفوح البركانية السمكية الأجزاء الخارجية الملامسة للهواء ذات نسيج زجاجي بينما الأجزاء الداخلية تكون دقيقة التبلور وعند تمدد الغازات في

الطفح البركاني وهرو بها منه فإنها تترك فراغات في الصخر يعـــرف باســـم الفقاقيع ويتكون النسيج الفقاعي. وإذا أمتلأت هذه الفراغـــات بمعـــادن ثانويـــة ترسبت من محاليل مرت بهذه الفقاقيع فإنه يتكون مـــا يســـمي باســـم النســـيج الأميجدالي Amygoidaloidal textire .

٤- النسيج كامل الهيئة **Hypidiomorphic texture**

تتميز الصخور الجوفية بهذا النسيج حيث تكون بعض البلورات المكونة للصخر كاملة الهيئة Idiomorphic أي لها شكل بلوري واضح المعالم والأوجه ظاهرة مميزة أما بلورات بقية المعادن البلورية المكونة لها فهي مختلفة الشـــكل Allotriomorphic تملأ الفراغات الموجودة بين البلورات كاملة الهيئة والسبب في ذلك أن المعادن القاعدية بردت بلوراتها وتبلورت أولاً فنمت بلورتها بحرية وأخذت بلوراتها أسطحا بلورية واضحة ثم تلتها المعادن الأكثر حامضية فملأت الفراغات التي وجدت بين بلورات المعادن القاعدية ولم تتمكن مـــن أن تكـــون أشكالاً بلورية مكتملة.

تواجد الصخور النارية في الطبيعة Mode of occurrence

تتصلب المجما أما في جوف الأرض أو علي سطحها أو بين هذا وذلك. وينتج عن كل حالة من هذه الحالات نوع مميز للصخور الناريـــة لـــه صـــفاته الخاصة من ناحية درجة التبلور وحجم البلورات وأشكالها وترتيبها وعلاقتهـــا ببعضها. وعلي ذلك يمكن تقسيم الصخور النارية علي أساس مكـــان تكوينهـــا إلي ثلاثة أنواع:-

أ) الصخور الجوفية Plutonic rocks

وهي صخور تصلبت علي أعماق كبيرة من سطح القشرة الأرضية في جوف الأرض تحت ظروف من الضغط والحرارة جعلت التبريد بطيئاً وبـــذلك تكونت صخور كاملة التبلور تظهر بها البلورات لها نسيج خشن مميز.

ومن أمثلة هذت النوع صخور الجابرو والجرانيت والديوريت وتتواجد الصخور الجوفية في أشكال مختلفة كما يلي:-

١. باثوليت Botholith

حيث تتواجد الصخور الجوفية في صورة كتل ضـــخمة تبلـــغ فئـــات الكيلومترات تتسع قاعدتها كلما تعمقنا لأسفل وتتكون عادة هذه الكتل من صخور الجرانيت.

٢. يوحي Boss أو ستوك Stock

وهي كتل ذات أحجام أصغر من الباثوليت وتبلغ مساحتها من ١ إلي ٤٠ كيلو متر مربع فقط.

ب) الصخور تحت السطحية (المتوسطة) Hypabyssal rocks

وهي صخور تداخلت بين طبقات القشرة الأرضية وتصلدت بالقرب من السطح ويردت بسرعة أكثر من الصخور الجوفية لذلك فإن بلوراتها دقيقـــة أو متوسطة ونسيجها دقيق التبلور. وقد يكون بهـــذه الصـــخور بلـــورات كبيـــرة Phenocrysts نمت في الماجما وهي في جوف الأرض ثم أنتقلت مع الماجما المكونة لهذه الصخور تحت السطحية حيث نرى بلورات كبيـــرة تحـــيط بهـــا بلورات دقيقة (نسيج بورفيري) .

ومن أمثلة هذه الصخور الفلسيت والدوليريت وتتواجد هذه الصخور في صورة سدود متوازية SIH أو سدود قاطعة dikes حيث نرى السدود المتوازية عبارة عن كتل مسطحة من الصخور الغازية، بينما نرى السدود القاطعة عبارة عن ماجما ملأت الشروخ والكسور القاطعة للطبقات ويتراوح سمك هذه السدود من سنتيمترات قليلة إلي مئات الأمتار ولكن الغالبية العظمى لا يزيد سمكها عن ثلاثة أمتار.

وتتواجد الصخور النارية تحت السطحية في أشكال عديدة منها لا كوليت Laccolith حيث تظهر الصخور في شكل الناقوس أو تسمى لوبوليث Lopolith حيث تظهر في شكل طبق أو يعرف باسم فاكوليت phacolith حيث تظهر في صورة السرج وقد يمتد كل من اللوبوليث واللاكوليت إلي مئات الكيلومترات ويتكونا في أعماق بعيدة نسبياً عن سطح الأرض.

جـ) الصخور السطحية أو البركانية Extrusive or volcanic rocks

وهي صخور تكونت بالقرب منم الفوهات البركانية ولها نسج زجاجي نتيجة لتبريد اللافا بسرعة فلم تسنح الفرصة لنمو البلورات ونتج لها نسيج خفي التبلور Crypto crystalline ومن أمثلة هذه الصخور الأيسيديان والبازلت والريوليت وغالباً ما تظهر هذه الصخور في صورة طفوح بركانية واسعة الأمتداد وسمكها بسيط تشبه الصفائح Sheets.

تقسيم الصخور النارية:-

توجد أنواع كثيرة من طرق تقسيم الصخور النارية، ولكن التصنيف ذي الفائدة العملية بالنسبة للطالب المبتدئ هو الذي يعتمد علي التركيب المعدني للصخر ويتوقف التقسيم علي الخواص الثلاثة التالية:-

١- كمية السليكا الموجودة بالصخر: أكثر من ٦٥% أو أقل من ٥٢% أو بين هذا وذاك. والذي يدل علي وجود السليكا بنسبة عالية وجود معدن الكوارتز. أما إذا لم يوجد الكوارتز فهذا يدل علي انخفاض نسبة السليكا في الصخور.

٢- نوع معدن الفلسبار الموجود في الصخر وكمية كل نوع علي حدة: وتشمل معادن الفلسبار الأنواع البوتاسية (أرثوكليز ميكروكلين ..... الخ). والأنواع البلاجيوكليزية (الصودية مثل الألبيت والأوليجو كليز، والكالسية مثل لأيرادوريت وأنورثيت).

٣- نوع النسيج المكون للصخر: أي حجم الحبيبات المختلفة. هل الصخر خشن الحبيبات "جوفي" أو دقيق الحبيبات أو زجاجي "بركاني".

وواضح أنه في حالة كون الصخر دقيق الحبيبات يصعب أو يستحيل معرفة المعادن المكونة له وبالأخص الكوارتز أو الفلسبارات، كما أن تعيين نوع وكمية الفلسبارات بدقة يكاد يكون من المستحيل أيضاً إجراؤه في الحقل أو بدراسة العينة بالعين المجردة. مثل هذه الدراسات الكمية الدقيقة تقوم بها في المعمل بواسطة الميكروسكوب المستقطب.

وصف بعض أنواع الصخور النارية الشائعة

الجرانيت والجرانوديورت Graoites & Grancdiorites

والجرانيت فاتح اللون حبيباته خشنة ومنظمة و يتكون أساسا من معدن الكوارتز والفلسبار (يوجد منها نوعين الارثوكليز او الميكروكلين و الاليجوكليز غالبا) ويمكن تمييز هذه المعادن بسهوله فالفلسبار البوتاسي لونه وردى او احمر خفيف، إما الاوليجوكليز فلونه ابيض به خطوط رفيعة ومتوازية ناتجة عن وجود التوائم عديدة التركيب .أما الكوارتز فيمكن تمييزه بأنه لا يوجد به اى

انفصام وله بريق زجاجي . ويحتوى الجرانيت بالاضافه إلى هذه المعادن على كميه بسيطة (حوالي ١٠%) من الميكا او الهورنبلند إما الميكا فتكون ممثلـه بمعدن البيوتيت ولو أنه قد يوجد بعض المسكوفيت . أما المعادن الاضافيه القليله فتشتمل معادن الزرقون وسفين والاباتيت والماجنتيت . وهذه المعادن بطبيعة الحال يصعب أو يستحيل رؤيتها وتميزها بالعين المجرده ، ولكن تميزهـا فـي المقطع الرقيق بواسطة الميكروسكوب المستقطب. ويتدرج هـذا الصـخر إلـي صخر آخر يعرف باسم صخر جرانوديوريـت يحتـوى علـي غالبيـة مـن البلاجيوكليز بدلاً من غالبية الارثوكليز في الجرانيت. أي أن الجرانوديوريـت يتكون من البلاجيوكليز والكوارتز وقليل (٥%) من الارثوكليز ونلاحظ غالبـاً إزدياد نسبة المعادن القائمة (الحديد ومغنسية) كلما أزدادت نسبة البلاجيو كليز، وينتج عن ذلك أن صخر الجرانوديوريت أغمق لوناً من صـخر الجرانيـت ، ولكن مثل هذه الفوارق يصعب عادة تمييزها بين الصخرين في الحقل أو فـي العينة. وهذه الصخور كثيرة الإنتشار في الصحراء الشرقية المصـرية وشـبه جزيرة سيناء ومنطقة أسوان.

السيانيت Syenite

صخر له نسيج حبيبي منتظم ولونه فاتح ويتكون بصفة أساسـية مـن معادن الفلسبارات البوتاسية والأوليجوكليز وكميات قليلة جداً مـن الهورنبلند والبيوتيت والبيروكسين. وهو في هذه الحالـة يشـبه الجرانيـت إلا أن نسـبة الكوارتز أصبحت قليلة جداً حيث لا تعدو ٥% ، وأصبح وجوده غير أساسي في تركيب الصخر. أما إذا زادت نسبة الأوليجوكليز عن الفلسبار البوتاسي فيصبح اسم الصخر مونزونيت Monzonite . وقد يوجد معدن النيفلـين Nepheline في صخر السيانيت بنسبة ٥% وفي هذه الحالة يعرف الصخر باسـم سـيانيت نيفليني والنيفلين ($Na\ A_1SiO_4$) معدن ذو بريق صمغي (أو شـحمي) ويشـبه

الكوارتز ولكنه يميز عنه بصلادته الأقل (من ٥ - ٦). وتحتوى بعض صخور السيانيت علي معدن كوراندوم (Al_2O_3).

الديوريت Diorite

صخر له نسيج حبيبي منتظم ولونه يميل إلي الداكن ويتميز بوجود البلاجيوكليز (أوليجوكليز أو أنديسيين)، أما الكوارتز والأرثوكليز فلا يوجدان وأما البيوتيت فقد يوجد بكمية قليلة، والبيروكسينات نادرة الوجود في هذا الصخر. أما المعادن الإضافية فتشمل الألمينيت والأباتيت ويغلب علي الصخر - كما قلنا - اللون الداكن نظراً لوجود المعادن الداكنة (الحديد ومغنيسية) بكميات غير قليلة. وهذا الصخر كثير الانتشار في الصحراء الشرقية وشبه جزيرة سيناء، حيث يكون كثيراً من الجبال القائمة في هذه المناطق.

الجابرو Gabbro

صخر حبيبي منتظم مكون معظمه من المعادن الحديد و مغنيسية السوداء اللون. وتشمل هذه المعادن البيروكسين والأوليفين بصفة رئيسية وقد يوجد الهورنبلند. فإذا كان كل الصخر تقريباً مكوناً من معدن البيركسين سمي بيروكينيت Pyrosenite . أما إذا كان مكونا من الأوليفين سمي دونيت Dunite أما إذا كان مكوناً من الهورنبلند سمي هورنبلنديت Hornblendite وتحتوى صخور البيريدوتيت عادة علي معادن الماجنتيت والكروميت والألمينيت والجارات. كما أن بعض الأنواع تحتوى علي البلاتين "في معدن الكروميت" والألماس. ومعدن الأوليفين - بل التحلل بالعوامل الكيميائية ، وينتج عن التحلل معدن السربنتين Serpentine [سليكات المغنسيوم المائية] . فإذا كان كل صخر البيريدوتيت منحلا فإن الصخر منتشر بين صخور الصحراء الشرقية المصرية.

الصخور البركانية Volcanic Rocks

وتشمل الريوليت Rhyolite (يقابل الجرانيت ولونه فاتح) ، والبازلت (يقابل الجابرو ولونه أسود) وكثير غيرها. ونظراً لأن هذه الصخور لها نسيج دقيق أو زجاجي لذلك فأنه يصعب أو يستحيل التمييز بين معادنها المختلفة في العينة، ويتميز البيوميس Pumice أو الحجر الخفاف بكثرة الفقاقيع الهوائية فيه مما يجعله يطفو علي سطح الماء. أما صخور الأبسيديان Obsidian والبشستون Pitchstone فهي صخور زجاجية متماسكة عديمة المسام.

ثانياً الصخور الرسوبية:-

هذه الصخور تكونت من صخور سابقة تفتت وتحللت بفعل العوامل الجوية المختلفة، ويتم ترسيب هذه الصخور المفتتة في أماكن تجمعها بواسطة المياه الجارية (الأنهار – البحار) أو الثلاجات أو الرياح. وتقوم عمليات التجوية Weathering بعمليات التحلل المعدني من تحلل كيميائي مثل الأكسدة والتميؤ – الكربنة أو تحلل فيزيائي بسبب التمدد والأنكماش بالحرارة والبرودة.

وكنتيجة مباشرة لعمليات التحلل تتكون المعادن الطينية والأملاح وتتبقىء المعادن المقاومة لعمليات التحلل مثل الكوارتز والزركون والجارنت والماجنتيت.

تكوين الصخور الرسوبية

تتم عمليات الترسيب بداخل أحواض الترسيب مثل أحواض البحار والمحيطات وتتراكم الرواسب التي يبلغ وزنها ملايين الأطنان سنوياً في المياه الضحلة قريباً من الأرض (٢٠٠ – ٣٠٠ كيلو متر من الشاطئ) وتترسب أيضاً الرواسب الدقيقة من أصداف لحيوانات مجهرية ورماد بركاني علي قيعان البحار والمحيطات.

وتترسب في بعض البحيرات رواسب الملح أو الجبس أو النطرون نتيجة لبخر مياه البحيرة.

وهناك رواسب أخرى تترسب مباشرة علي الأرض فعند حواف الهضاب والجبال تتراكم أكوام من المواد الصخرية المهشمة وفي الصحاري تتراكم اكوام ذات أشكال مختلفة من الرمال والأتربة التي تذروها الرياح وتنقلها من مكان إلي أخر والتي تعرف باسم الكثبان الرملية .

وتتميز الصخور الرسوبية بالعديد من الخواص التي تميزها عن الأنواع الأخرى يمكن التفرقة بينها بواسطة اللون – السمك أو النسيج ، بالإضافة إلي أحتوائها علي بعض المواد المعدنية مثل البترول – الفوسفات والفحم وأحتوائها أيضاً علي الحفريات التي قد تكون كبيرة أو مجهرية.

تقسيم الصخور الرسوبية

عموماً يمكننا تقسيم الصخور الرسوبية إلي خمسة أقسام

١. الرواسب الكيميائية Chemical Sediments
٢. الرواسب العضوية Organic Sediments
٣. الرواسب المتبقية أو المتخلفة residual Sediments
٤. الرواسب البرية Terrigeneous Sediments
٥. الرواسب البركانية الفتاتية Pyroclastic Sediments

١) الرسوبيات الكيميائية Chemical Sediments

وهي الرواسب التي تكونت بواسطة عمليات الترسيب المباشر في بيئات تحت مائية Subaqueous environment وهي تشتمل علي رواسب

المتبخرات **evaporates** **مثل الجبس** Gypsum والصخر الملحي Rock Salt وأيضاً تشتمل علي صخور **التوفا** **Tufa** والطين الجيري Lime Mud.

٢) الرواسب العضوية Organic Sediments

وهي رواسب **تتكون من المواد** العضوية سواء كانت من أصل حيواني أو من أصل نباتي ، **مثل الفحم** والحجر الجيـــري الهيكـــل Skeletal Lime Stone.

٣) الرواسب المتبقية أو المتخلفة residual Sediments

وهي الرواسب **التي** تركت في **المكان** بعد عمليات التجوية التي جـــرت علي صخور ما وتخلفت عنها رواسب مثل اللاترايت Laterites والبوكســـيت bauxites.

٤) الرواسب البرية terrigeneous Sediments

وهي رواسب **أشتقت أساساً** من الأرض وتشـــمل الصـــخور **الطينيـــة** Mudrocks وصخور **الكونجلوميرات** Conglomerates.

٥) رواسب الفتات البركاني Pyroclastic Sediments

وهذه الرواسب نواتج **للنشاطات** البركانية من رماد بركـــاني ashes ، tuffs ، **Volcaniclastic sand** للفتانيات البركانية الرملية ، agglomerates الرصيف البركاني.

وعموماً يمكننا القول **علي الرسوبيات** التي تتكون من جسيمات مفتتة **أو** غيـــر مترابطة اسم فتاتية **Clastic** **أو** كسرات Fragmental والخمسة أقسام الرئيسية للصخور الرسوبية يمكن تقسيمها **إلي** نوعين منفصلين كما يلي:-

١. **allochthonous deposits** رسوبيات دخيلة أو مجلوبة النشأة.

٢. autochthonous deposits رسوبيات مكانية النشأة أو ذاتية النشأة.

وتعتبر الرسوبيات مجلوبة النشأة هي رسوبيات ثم نقلهم من بيئتهم الأصلية إلي البيئةالتي فيها ثم ترسيبهم وهي تشمل الرواسب القتاتية البركانية Pyroclastic sed والرواسب البرية Terrigeneous sed أما الرسوبيات ذاتية النشأة فهي رواسب تكونت داخل البيئة التي فيها ترسبت وهي تشمل الرواسب الكيميائية والعضوية والمتخلفة أو المتبقية .

Classification of Sedimentary rocks

تقسيم الصخور الرسوبية

a) chemical Precipitates رواسب كيميائي

المتبخرات evaporates , Gypsum ,rock

وتشمل الصخر الملحي Rocksalt

b) organic deposits رواسب عضوية

مثل الفحم Coal , الحجر الجيري Limestone

C) Residual deposits رواسب متبقية أو متخلفة

مثل Laterites والبوكسيت Bauxites

d) Terrigenous deposits رواسب برية

وتشمل كل من الصخور الطينية Clay

وصخور الكنجلوميرات Conglomerates

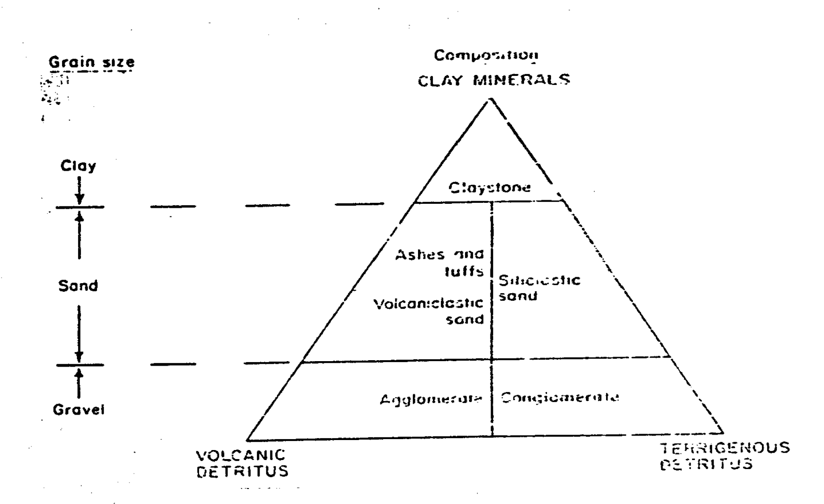
e) Pyroclastic deposits رواسب الفتات البركاني

وتشمل Tuffs , Volcaniclastic

الرصيص البركاني agglomerates ,

أولاً : تقسيم الرواسب مجلوية النشـــأة Allochthonous ويمكننـــا تقســـيم الرواسب مجلوية النشأة بأستخدام شكل (١) أعتماداً علي الحجم الحبيبي Grain Size والتركيب Composition

وهذا الشكل يمثل بمثلث علي رؤسه الثلاثة تتواجد ثلاث مكونات وهي المعادن الطينية Clay Minerals والجتات البركـــان Volcanic Detritus و Terrigenous detritus.



شكل (١)

وعن طريق هذا الشكل يمكننا التمييز بين أنواع الرواسب مجلوبة النشأة المختلفة.

كما يمكننا بأستخدام شكل شبرد 1954 , Shepard شكل ( ) الذي يمثل بمثلث له ثلاث رؤس يمثل ثلاث مكونات وهي الطين Clay ، الرمل Sand والرمال دقيقة الحجم Silt وبأستخدام هذا الشكل يمكننا التفرقة بين أنواع الرواسب المفككة Unconslidated Sediment أعتماداً علي الحجم الحبيبي Grain Size.

ويمكننا تصنيف الرواسب مجلوبة النشأة إلي أربع أنواع رئيسية

١. الصخور الطينية Mudrocks
٢. الحجر الرملي Sandstone
٣. الصخور الفتاتية البركانية Pyroclastics
٤. الصخور الخصوبة أو الجلاميدية Rudaceous rocks

وفي ضوء هذا التصنيف سوف نشرح أهم الصخور التي أستخدمها المصري القديم بالتفضيل للوصول إلي أهم خصائصها ومكوناتها لفهم وأستنباط ميكانيكية التحلل أو التلف التي تحدث بها ونواتج هذا التحلل والأستفادة بهذه المعلومات في مجال ترميم وصيانة الأثار الحجرية.

ثالثاً الصخور الطينية Mud rocks :-

في البداية سوف نحاول سرد بعض المصطلحات المهمة في مجال ترميم وصيانة الآثار.

- مصطلح كلمة Mud وهو الطين المبتل Wet clays مع كمية محدودة من Silt والرمل Sand. والمثيل المتحجر منه (الذي حدث به تصلب) يسمي Mud stone.

- Clays وهي رسوبيات تحتوى علي معادن طينية بأحجام حبيبية صغيرة (أصغر من 0.0039 mm) ويتم ترسيبها بواسطة الماء حيث تكون نسبة المسامية بها ٨٠% ولكن معظم هذه المسامية يتم فقده سريعاً بواسطة التجفيف أو فقد الماء dewatering بواسطة الضغط الواقع علي هذه الرسوبيات.

  ومثليتها المتحجرة يطلق عليها **Clay Stone** الحجر الطيني.

- Silts الرمال دقيقة الحبيبات وهي التي تحتوى علي حجم حبيبي بين 0.0039 mm إلي 0.0625 ومثيلة المتحجر هو الحجر الرملي دقيق الحبيبات Siltstone.

- Shale هذا المصطلح يطلق علي الرسوبيات ذات الحجم الدقيق حيث يوجد بها رواسب Clay الطين و Silt الرمل دقيق الحبيبات ولا يمكن التفرقة بين الطين والرمل دقيق الحبيبات بها كما أنها تتميز بطبقات منفصلة وذلك لتواجد بقايا من معادن الميكا مرتبة في داخل رقائق الطبقات وتحتوى صخور mud علي أربع مكونات رئيسية هي:

١. معادن الطين Clay minerals.

٢. الكربونات Carbonates.

٣. الحبيبات الحتاتية Detrital grains.

٤. المواد العضوية Organic matter.

وتتكون الحبيبات الحتاتية من الكوارتز ذو حبيبات دقيقة غالباً مــزواه ومــن معادن الميكا والمعادن الثقيلــة heavy mineral مثــل zircon الزركــون والأباتيت Apatite في حين أن معادن الطين داخل هذه الصــخور تكــون مزيجاً أو خلطة من معادن الطين يطلق عليها Clay Stones أو يطلق عليها Orthoclay Stones للدلالة علي نقائها. وبزيادة محتــوى الجيــر Lime بداخل الصخور الطينية فإنه يطلق عليها مــارل Marls وعنــدما تصــبح الصخور Mud rocks يطلق عليها صخور طينيــة جيريــة Pure lime Mudrocks (ميكريت Micrites).

- Sapropelites and oil Shales الطفلة الزيتية و سابروبيليت عموماً فــإن المواد العضوية تتواجد في الرواسب بكميات ضئيلة جداً ولكنها في الصخور الطينية تكون متوفرة وقد خطت هذه الصخور الطينية (الطفلة) بالكثير مــن الدراسات للعلمية حيث تكون غنية بالعضويات والتي يمكن أن تكون مصدراً طبيعياً لخام البترول لذا يطلق عليها Oil shales أما مصطلح ســابروبيليت فيطلق علي الصخور الطينية العضوية النقنية Pure Organic Mud rocks ويمكننا تصنيف أنواع المواد العضوية الموجودة في هذه الصخور إلي أربعة أنواع :-

١. الغاز الطبيعي Natural gas.

٢. الزيت الخام Crude oil.

٣. الأسفلت Asphalt.

٤. كيروجين Kerogen.

• Orthoclay stones and clay minerals معادن الطين النقية والمعـــادن الطينية صخور Orthoclay stones وهي درجة من درجـــات الصـــخور الطينية تتركب من مجموعة معادن الطين. في حين أن معادن الطـــين هـــي مجموعة من المعادن واسعة الانتشار والمعقدة والتي تكونت أساساً من التحلل الكيميائي Chemical degradation لمعادن قديمة خلال عمليات التجويـــة المختلفة.

ويوجد ثلاث مجموعات رئيسية من معادن الطـــين الأليـــت illites ، السيمكتيت Smectites ، الكاولين Kaolins بالإضافة إلي كل من الكلوريت chlorites والجلوكونيت Glauconite.

وكل من الكلوريت والجلورنيت يختلفا نوعاً ما عن باقي المعادن الطينية في طريقة التكوين ولكنها متشـــابهة فـــي التركيـــب Composition وفـــي التركيب الذري Atomic Structure .

الشكل البلوري لمعادن الطين يأخذ الشكل رباعي الأوجه حيث نجـــد أن لهذه البلورات بناء صفائحي يعرف باسم Sheet Silicate Structure حيـــث نجد أن كل بلوره تتكون من مئات الصفائح وتتكون كل صفيحة من طبقتين من السيليكا يحصران طبقة من الألومينا.

وهناك معادن ذات تركيب طبقي مزدوج حيث تتكـــون البلـــورة مـــن صفيحة أو طبقة من الألومينا وصفحة من السليكا مرتبطين مع بعض مثل معدن الكاولينيت. وهناك أيضاً معادن ذات تركيب طبقي ثلاثي حيث نجد أن صفيحة الألومينا تكون محصورة بين طبقتين من السليكا مثل معادن المونتيمورلونيـــت والأليت وتتكون كل مجموعات المعادن الخمسة السابقة (الأليت – السيمكتيت – الكارولين – الكلوريت – الجلوكونيت) من سليكات الألومنيوم المائية.

Hydrous Alumino silicates (البناء البلوري لها).

أما تركيب كل من الكلوريت والجلوكونيت فتكون أكثر تعقيداً حيث يتركب من خلطة من تركيب طبقي مزدوج وتركيب طبقي ثلاثي لتتناسب مع الحديد والماغنسيوم الداخلة في تركيبهم.

١) الكاولين Kaolin.

هو أبسط معادن الطين في التركيب فهو يتكون من معادن الفلسبارات Feldspars بواسطة كل من عمليات التحلل الحراري Hydro thermal Alteration وبواسطة التجوية السطحية والكاولين هو معدن شائع حقاق من معادن الطين يشتق أساساً صخور الجرانيت ومن صخور النيس.

ونلاحظ أن الكاولين يتكون بكثرة أثناء عملية الأحلال Diagenesis حيث يتكون كاولين ذات شكل بلوري مميز – شكل الكتاب Books أو يتكون في صورة تجمعات متطاولة منسجمة أو بلورات ذات شكل دودي – Worm Like crystals.

في بعض الأحوال أو الظروف المناسبة فإن رواسب الكاولين تكون كافية لتكوين حجر طيني كاولين نقي Pure Kaolin claystone وهذا الصخر يطلق عليه قديماً الطين الصيني china clay أو Fire clay وتتكون هذه الصخور في البيئات غير البحرية حيث أن الكاولين يتحول بسرعة إلى طين أكثر تعقيداً في وجود ماء البحر. ويستخدم الكولين في كثير من الأغراض الصناعية مثل صناعة السيراميك والورق والصناعات الدوائية.

٢) الأليت Illite

يطلق عليها أحياناً Hydromicas ميكا مائية تتكون من ثلاثة طبقات من سليكات الألومنيوم مع اكثر من ٨% من البوتاسيوم K2O وهذا البوتاسيوم

يتواجد نتيجة لعدم اكتمال التحلل التام للفلسبارات البوتاسية Potash Feldspars إلي كاولين أو لعمليات الأحلال Diagensis تحدث للكــاولين داخــل البيئــات البحرية .

والأليت من المعادن الطينية الشائعة في الرسوبيات ولكنها أقل ملاحظة بالنسبة للكاولين لأنها نادراً مــا توجــد كبلــورات ولكنهــا تــري بواســطة الميكروسكوب. وحتي تحت الميكروسكوب الالكتروني فــإن بلــورات الأليــت صغيرة وأقل ظهوراً من الكاولين.

وعموماً فإن الكاولين والألين يتكونوا من مصدر جرانيتي ويلاحــظ أن الكاولين يظهر علي حساب الأليت والأليت يظهر علي حساب المونتور لونيت.

هذه حقيقة لأن ميل جسيمات الطين لتكون دقائق مترسبة يحدث عنــدما تترسب من ماء حامضي Acidic fresh water قادم إلي ماء قاعدي بحــري Basic sea water والتحول الحادث لمعادن الطين يحدث داخل البحــر أثنــاء عمليات النقل والدفن الأولي Early burial وهناك العديد من التحــولات مــن معادن الكاولين إلي الأليت تحدث بعد عملية الدفن وذلك مــن خــلال عمليــات الاحلال Diagensis.

٣) معدن المنتورلونيت Montmorillonite

هذا المعدن من معادن الســمكتيت Smectites والــذي يمثــل فيهــا المنتمورلونيت هو المعدن الرئيسي وهذه المجموعة تتكون من ثلاث طبقات ولها خواص مميزة غير عادية من ناحية التمــدد والانكمــاش Expanding and contracting لأمتصاص الماء أو فقد الماء.

ومعدن المنتمورلونيت تحتوى علي أكثر من ٢٠% ماء بالإضافة إلــي الكالسيوم والماغنسيوم.

وعموماً فإن معادن Smectite ممثلة كمكون رئيسي لصخور Mud rocks والتي تتركب أساساً من smectite clays والتي يطلق عليها Bentonite والتي تعرف بكونها مكاشف ظاهرة علي الأرض لها سطح ناعم وشكل يشبه القرنبيط Couliflouwer .

ويتكون Bentonite البنتونيت بواسطة التحلل الحادث للرماد البركاني Volcanic ash في البيئات البحرية والقاربة. وهو يتكون من كسرات زجاجية فقدت شفافيتها تتواجد مع حبيبات ميكروسكوبية من الكوارتز والميكا والفلسبارات والمعادن الثقيلة. ويستخدم النيتونيت لتسهيل أداة البريمات (الحفارات).

٤) الكلوريت **Chlorite**

والكلوريت يشبه معادن الطين ولكنه يشارك بألفة أو قرابة مع مجموعة معادن الطين. وهو عبارة عن طبقات مختلطة من الطين Clay مع أكثر من ٩% من اكسيد الحديد feo و ٣٠% من اكسيد المغنسيوم Mgo ويظهر الكلوريت كنواتج تحلل لمعان ميكا سابقة التكوين وهو أيضاً شائع كمعادن أضافية حتاتية في الرمال. وفي الصخور الطينية يحل الكلوريت محل الأليت illite ومعادن الطين الأخرى عند النقطة التي عندها يحدث أحلال في عمليات التحول وهو مكون مميز كمادة من المواد اللاحمة diagenesis دقيقة التبلور لصخر الجرايواكي Grey wackes.

٥) الجلوكونيت **Glauconite**

النوع الخامس من معادن الطين هو الجلوكونيت ومثله مثل الكلوريت فهو يحتوي علي طبقات مختلطة بالإضافة إلي معادن الماغنسيوم والحديد والبوتاسيوم والجلوكونيت لا يتكون من التجوية المائية الحرارية

hydrothermal أو التجوية الأرضـــية Terrestrial weathering لمعـــادن قديمة.

ويظهر الجلوكونيت في صورة حبيبات خضراء داكنة غيـــر متبلـــورة نادراً ما تكون أكبر من حجم الرمل الدقيق وتوجد في صـــخور Mud rocks وفي صخور الحجر الرملي Sand stone وعند وجودها يـــوفره فـــي البحـــر الرملي فإنه يطلق عليها الرملي الأخضر Green Sand.

ويظهر أيضاً الجلوكونيت مالئاً لأصداف الفورمونيفرا ويظهر فـــي الرواســـب القديمة بحرية المنشأ.

الحجر الرملي Sand Stones

الحجر الرملي من أهم المجموعات الخاصة بالصخور الرسوبية وعموماً فإن حوالي ٣٠% من الرسوبيات التي تغطي العالم متكونة أساساً مـــن الحجـــر الرملي بالإضافة إلي الرمال البرية terrigenous sand.

وهذه النوعية من الصخور كانت هدفاً للكثير من البحوث والدراسات في العقود الأخيرة وذلك أما لدراسة خواص وتركيب الحجر الرملي لذاته أو لدراسة طرق الأستغلال الاقتصادي للمواد التي بداخل الصخور الرملية. فالحجر الرملي يتميز بمساميته العالية لذا يكون غالباً خزانات الميـــاه الأرضـــية Aquifers أو خزانات للمواد الهيدروكربونية.

وهذه الصخور لها نسق واحد في التطبـــق والخـــواص البتروفيزيائيـــة Petrophy sical character وذلك بالمقارنة بالصخور الجيرية Carbonates لذلك نجد أنه من السهل التنبأ بهندستها وتركيبتها وبالتالي يتواجد الخزانات بهـــا أو عدم وجودها.

تقسيم وتسمية الحجر الرملي

Nomenclature and classification of sand stones

عملية تقسيم الصخور الرملية كانت دائماً موضوع لكاديمي تم بحثه من قبل الكثير من علماء الجيولوجيا منذ القدم. كان من أشهر هؤلاء العلماء كل من كلين Klein – ١٩٦٣ وبتجون Pettijohn – ١٩٧٢ .

وعموماً فإن نظام التسمية أو التقسيم لابد أن يكون له روابط قياسيه يمكن عن طريقها التفرقة بين أنواع صخور الحجر الرملي المختلفة.

هذه الروابط القياسية bounding Parameters تعتمد علي بعض الخواص الأصلية بالحجر الرملي فهي أما أن تعتمد علي خواصه الفيزيائية physical composition (المادة اللاحمة matrix content ، الحجم الحبيبي grain size) أو تعتمد علي التركيب الكيميائي (المعدنية Mineralogy).

معظم التقسيمات تتواجد في صورة مثلث له ثلاث أركان، تمثل أركانه بثلاثة مكونات رئيسية وهي: clay الطين – الفلسبار Feldspar – الكوارتز quarts أو المكونات الصخرية Lithic.

وقد تعتمد طريقة التقسيم أو التسمية علي درجة النضج فالحجر الرملي يمكن أن يحدث له نضج بطريقتين:

١) نضج كيميائي matures chemically.

٢) نضج فيزيائي matures physically.

بالطبع من المعروف أنه خلال عمليات التجوية فإن المعادن غير الثابتة unstable minerals يتم تدميرها أما المعادن الثابتة كيميائيـــاً chemically stable minerals تزداد نسبتها.

فنجد الكوارتز أثبت المعادن كيميائياً أما الفلسبار فنجد أنه من المعـــادن غير الثابتة كيميائياً وبالتالي فإن دليل النضج الكيميائي.

Index of chemical maturity للصخر بناء علي ذلك تعتمد علي النسبة بين معادن الكوارتز إلي معادن الفلسبارات.

ومن جهة أخرى فإن النضج الفيزيائي physical maturity يصف لنا التغير النسيجي textural changes التي تحدث بالصخور منذ زمن تجويتهـــا وحتى زمن ترسيبها.

وهذه التغيرات تشمل زيادة درجة الفرز Sorting ونقص محتوى المادة اللاحمة matrix content.

لذا يمكننا اعتبـــار دليـــل النضـــج الفيزيـــائي index of degree of physical maturation علي أنه النسبة بين نسبة الحبيبات في الصخور إلـــي نسبة المادة اللاحمة لذلك فمن خلال ذلك يمكن تقسيم صخور الحجر الرملي من خلال مثلث له ثلاث أركان عليها المكونات الأساسية الأتية الحبيبـــات الثابتـــة Stable grains – المادة اللاحمة matrix – الحبيبات غير الثابتة unstable grains.

وكحقيقة ثابتة فإنه بزيادة الحبيبات الرملية فإن نسيج الصخر يصبح اكثر نضجاً. ويمكننا تقدير قيمة النضج maturity بالطريقة التالية:-

$$MP = \frac{G}{G + M} \times 100$$

MP ⟶ physical maturity index — دليل النضج الفيزيائي

G ⟶ The Volume of grains — حجم الحبيبـــات

M ⟶ The Volume of Matrix — حجم المادة اللاحمة

ومن جهة أخرى يمكننا حساب النضج الكيميائي chemical maturity index

$$MC = \frac{GS}{GS + Gu} \times 100$$

MC ⟶ Chemical maturity index — دليل النضج الكيميائي

GS ⟶ The Volume of chemically stable grains

حجم الحبيبات الثابتة كيميائياً

Gu ⟶ The Volume of chemically unstable grains

حجم الحبيبات غير الثابتة كيميائياً

ومن خلال الربط بين دليل النضج الفيزيـــائي والكيميـــائي يمكننـــا أن نحصل علي دليل النضج النهائي

$$Mn = \frac{MC + MP}{2}$$

Mn ⟶ The net maturity — دليل النضج النهائي

وهذا النظام يمكن أن يتخذ كوسيلة لتسمية وتقسيم الصخور الرملية كمية المواد الطينية في الحجر الرملي أحسن دليل علـــي محتـــوى المـــادة اللاحمـــة Matrix، الفلسبار معدن غير ثابت كيميائياً ويستخدم دليلاً للنضج الكيميـــائي ، الكوارتز Quarts فيعتبر دليلاً علي الثبات الكيميائي Chemical Stability.

وبأستخدام كل من الكوارتز والفلسبار والطين في شكل في صورة مثلث يمـثلاً أركانه الثلاثة يمكننا تقسيم الحجر الرملي.

تأثير عملية الأحلال أو التغير علي مسامية الحجر الرملي

The effect of Diagensis on the Porosity of Sandstones

مصطلح كلمة diagensis عملية الأحلال أو التغير

هو مصطلح يشير إلي التفاعلات التي تحدث داخل الرواسب بين معدن ومعدن أخر أو بين معدن أو معادن متعددة والمحاليل التي تمر بين الفراغات أو من خلال الحبيبات المكونة للرواسب.

أو هو مصطلح يشير إلي عمليات التحول أو التغير التي نظـراً علـي الرواسب بعد عمليات الترسيب.

وقد قسم دابليس Dapples – ١٩٦٧ عملية التغير diagenesis التي تحـدث للصخور الرملية إلي ثلاث مراحل هي كما يلي:-

1- redoxomorphic 2- Locomorphic 3- phyllomorphic

وعند أي نقطة في أي مرحلة من المراحل السابقة التي يمر بها الحجر الرملي عند تعرضه لعمليات التجوية فإن هذا يؤدي إلي تكون المرحلة الرابعـة epidiagenesis.والتي يمكن توضيح هذه المراحل كما يلي :-

أولاً مرحلة الأكسدة والأختزال redoxomorphic phase

عند ترسيب الصخر الرملي فإنه يمر خلال العمليـات الفيزيائيـة مـن الضغط Compaction ونقص الماء dewatering وبعد أنتهاء هذه العمليات وبعد الترسيب فإن أول التغيرات الكيميائية التي تمر بها الصخور الرملية هـي

عملية الأكسدة oxidation أو الأختزال reduction والتـــي تعنـــي مصــطلح redoxomorphic

فالصخور الرملية التي تملك نفاذية عالية وتترسب فوق مستوى المـــاء الأرضي water table سوف تتعرض لتفاعلات الأكسدة حيث تتعرض هـــذه الصخور لعمليات الأكسدة من خلال الهواء الجوي والماء الأرضي المؤكسد.

حيث يتم أكسدة المواد العضوية organic matter ويتّم أيضاً أكسدة مركبـــات الكبريت وتحمل كأيونات كبريت ذائبة Soluble Sulphate ions.

ويتأكسد الحديد إلي اكسيد الحديـــديك Ferric Oxide بلـــون الأحمـــر ويكون قشور حول الحبيبات الحتاتية ويمتزج مع أو في المادة اللاحمة وهذا ما يعزى إليه لون الحجر الرملي الأحمر المرتبط تكوينه بالأصل القـــاري ســـواء كانت الرواسب نهرية أو رواسب الرياح.

وفي المقابل فإن الحجر الرملي الطيني المترسب تحت مستوي ســـطح الماء الأرضي فإنه يميل إلي تفاعلات الأختزال وذلـــك للـــنقص النســـبي فـــي الأكسجين الحر.

حيث نجد أن المواد العضوية قد تحفظ ويتحد الحديد مع الكبريت ليكونا معـــدن البيريت Pyrites.

وهذا الاتحاد للمواد مع بعض مع نقـــص red ferric oxide اكســـيد الحديديك الأحمر يعطي الرواسب اللون السنجابي الأسمر الرمـــادي المخضـــر للرواسب.وخلال هذه المرحلة نجد أن التغير في المسامية يتم بفقد هذه المسامية ببطْ يحدث هذا كنتيجة أولية إلي تـــأثير كـــل مـــن الضـــغط ونقـــص المـــاء dehydration (physical Processes) أكثر من كونه راجع إلـــي التـــأثير الكيميائي لعمليات Diagensis.

ثانياً مرحلة لوكومورفك The Locomorphic phase

وهي المرحلة الثانية من عمليات التغيير Diagensis التي تحدث بالحجر الرملي وتشمل عملية اللحم Cementation.

والمادة اللاحمة Cement هي مواد متبلورة تترسب بداخل ثقوب الرسوبيات بعد عملية الترسيب. في حين أن مصطلح Matrix فهو يعني أيضاً المادة اللاحمة أيضاً ولكن في هذه الحالة تكون microgranular material وتتكون في ثقوب الرسوبيات أثناء عمليات الترسيب الأولي في النشأة الأولى وقبل أن تحدث عمليات Diagensis.

وأغلب المواد اللاحمة الموجودة في الحجر الرملي هي Silica السليكا و Carbonates وأيضاً هناك مواد لاحمة أخرى مثل Hematite اكسيد الحديديك والمواد الطينية.

وبالطبع فإن التأثير النهائي لترسب هذه المعادن اللاحمة في هذه المرحلة يكون النقص الشديد أو تدمير المسامية البينية الأولية والنفاذية الخاصة بالحجر الرملي.

a) Carbonate cements المادة اللاحمة الجيرية

المادة اللاحمة الجيرية في الحجر الرملي تتكون من الكالسيت Calcite أو الدولوميت وهذه المواد تترسب من المحاليل الغنية بكربونات الكالسيوم من الماء الحبيس connate water الناتج عن عمليات الضغط Compaction الذي يحدث بالرسوبيات وأيضاً من أذابة الأصداف والكالسيت والدولوميت موجودة بداخل الحجر الرملي الطيني بداخل المادة اللاحمة الطينية Clay matrix.

b) Silica Cements المادة اللاحمة السليكاتية

يتم لحم صخور الحجر الرملي غالباً بدرجات متفاوتة بواسطة مادة السليكا ونادرا ما تكون السليكا في صورة سايكا غروية غير متبلورة Amorphous Colloidal hydrated أو في صورة أوبال Opal ويتم ترسيب السليكا من محاليل غنية تم أشتقاق السليكا فيها من الكسرات العضوية مثل الدياتوم والراديوراليا ومن الأسفنج السليكاتي أو ترسبتْ من محاليل غنية بالسليكا ناتجة من عمليات الضغط Compaction التي تحدث للرواسب الطينية

ثالثاً مرحلة الفيلومورفك The Phyllomorphic phase

المرحلة الثالثة وتعرف علي أنها تقع بين الحد الفاصل بين مرحلة Diagensis وبين مرحلة التحول المنخفضة Low – grade morphism فبنهاية مرحلو الثانية Locomorphic فإن كل الثقوب الأولية يتم تدميرها بواسطة عمليات اللحم.

وفي هذه المرحلة فإن الصخور الرملية الطينية والمعادن غير الثابتة المتغيرة تقوم بأعادة تبلورها لتكوين معادن الكلوريت chlorite والبيوتيت والمسكوفيت وتؤدي إلي نمو الأنسجة الشستوسية Schistose textures وفي حالة الحجر الرملي النقي فإن الحبيبات الحتاتية ترتبط مع بعضها وتبدأ في التغير إلي كوارتزيت متحول.

المرحلة الرابعة أو مرحلة تكوين المسامية الثانوية

Epidiagenesis (The Formation of Secondary Prosity)

في أي مرحلة من المراحل السابقة فقد ترتفع الرسوبيات وبالتالي تتعرض لعمليات التجوية المختلفة عن ذلك تكون الرواسب تعرضت للمرحلة الرابعة Epidiagenesis.

وقد تكون عمليات التجوية للراوسب عميقة ومؤثرة وبالتالي تؤدي إلـــي زيادة درجة المسامية والنفاذية لهذه الصخور.

وفي هذه المرحلة قد يتعرض الصـــخر لعمليـــات التجويـــة الطبيعيـــة Physical weathering وأهم هذه العمليات مايلي:-

١. release of over burden pressure عملية رفع الضغوط الحادثة بسبب الأحمال الصخرية فوق طبقات الصخور الرسوبية .

٢. تحرك الكتل الصخرية علي المنحدرات الأرضية للصخور الرسوبية ومـــن ثم يمكن أن تحدث الشروخ والكسور بهذه الصخور.

ومن جهة أخرى فإن التغيرات الكيميائية الناتجة من التجوية الكيميائيـــة تنشأ المسامية الثانوية بالصخور الرسوبية بواسطة عمليات الغسيل Leaching.

ففي الحجر الرملي الجيـــري Carbonate cemented Sandstones فعند مرور المياه الأرضية الغنية بالأحماض والهواء ثم عليه فإنها تقوم بعمليات الغسيل Leaching لنزع المادة اللاحمة وتحمل أيوناتهـــا الذائبـــة إلـــي هـــذه المحاليل.وقد تتسبب في ترك الحجر الرملي بدون مواد لاحمة بمسامية عالية قد تصل إلي المسامية الأولي لهذه الصخور التي كانت بصـــحبتها أثنـــاء نشـــأتها الأولي أثناء عملية ترسيبها.

لذا فإنه بحدوث عمليات Leaching فإن المســـامية الثانويـــة تـــزداد . وبالتالي فإن الرسوبيات تتأثر بهذه المرحلة بشدة ويتمثل هذا بزيـــادة المســـامية الثانوية عن طريق عمليات التجوية المختلفة.

أهم محاجر الحجر الجيري والرملي المستخدمة في بناء المباني المصرية القديمة:

لاشك أن المعمار المصري القديم قد نجح في اختيار الأحجار الجيرية ، والرملية التي تتميز بمظهرها الناصع وسطحها المستوى وصلادتها العالية في تشييد المقابر والمقاصير والأهرامات والمعابد.

والواقع أنه مع بداية استخدام الأحجار في أعمال البناء في مصر كتب للحضارة المصرية القديمة الخلود والبقاء شامخة علي مر الزمن، لأن الأحجار تعتبر أصلد مواد البناء و أكثرها مقاومة لعوامل الزمن وعومل التلف والفناء المختلفة فهي تفوق في مقاومتها لتلك العوامل أعواد النباتات والأخشاب الجافة التي استخدامها المصري القديم في تشييد منزله الأول كما أن الأحجار تعتبر أكثر مقاومة لما سبق ذكره من عوامل التلف من الطوب اللبن الذي استخدم علي نطاق واسع في تشييد المنازل والمقابر المصرية القديمة وخاصة منذ عصر الأسرات.

إلا أن كثيراً من المنشآت التي شيدت بالطوب اللبن لم تستطيع مقاومة – عوامل التلف وأهمها المياه الأرضية فتعرضت للتهدم والفناء. وما بقي منها يحتاج إلي علاج وصيانة فورية تعيد إليها قوتها وتماسكها التي تأثرت كثيراً نتيجة ما تعرضت له بسبب التأثيرات الضارة لعوامل التلف المختلفة.

ويمكن القول بأن الحجر الجيري يعتبر أول وأهم الأحجار التي – استخدمت في أعمال البناء القديمة في مصر وخاصة منذ عصر الأسرة الثالثة حتى الأسرة الثامنة عشرة إذ استخدم هذا الحجر في تشييد هرم الملك زوسر بسقارة (الأسرة الثالثة) والذي يعتبر أول بناء في التاريخ شيد من حجر. ثم بدأ

الحجر يستخدم علي نطاق واسع في تشييد الأهرامات المصرية القديمة وخاصة أهرامات الجيزة التي شيدها ملوك الأسرة الرابعة خوفو وخفرع ومنقرع.

وإذا كانت هذه الأهرامات قد شيدت من أحجار جيريـــة محليـــة إلا أن أسطحها الخارجية قد كسيت بقطع من الحجر الجيري الذي جلب مـــن محـــاجر الحجر الجيري بطرة والمعصرة وذلك نظراً لما تتميز به أحجار هذه المحـــاجر من مميزات عديدة جعلتها صالحة لأغراض البناء والتكسية وأهم هذه المميزات اللون الأبيض ناصع البياض ، والصلادة العالية وخلوها من التشققات والمـــواد الشائبة التي قد تظهر علي السطح أحياناً مثل حبيبات الرمال التي تختلط بكثيـــر من الأحجار الجيرية.

ومن أجل التعرف علي الدور التاريخي والمعماري الذي لعبته محـــاجر الحجر الجيري والرملي في الحضارة القديمة في عصورها الفرعونية واليونانية الرمانية والقبطية والإسلامية قام الدكتور محمد عبد الهادي بتحليل عينات مـــن محاجر الحجر والرملي التي لعبت دوراً هاماً في تشييد العمائر الدينية والحربية القديمة في مصر وخاصة المحاجر الآتية :

أولاً : محاجر الحجر الجيري Limestone quarries

١) جبل المكس Max quarry

لازالت بقايا هذا الجبل تحتل الجزء الغربي للاسكندرية وقد اســتخدمت قطع الأحجار التي اقتطعت من هذا الجبل في تشييد المسرح الرومـــاني وقلعـــة قايتباي بالاسكندرية ، وقد تكون هـــذا الجبـــل خـــلال عصـــر البلايستوســـين Pleistocene age وذلك بعد انحسار المياه عن هذه المنطقة ، ولهـــذا الســـبب يعتبر الحجر الجيري في هذا الجبل غنياً بالمكونات العضوية المختلفة كما يعتبر

هذا الحجر من نوع الحجر الجيري البطروخي oolitic limestone ويتميز هذا الحجر بالمميزات الأتية :

مميزات أحجار المكس :

١. أنه يحتوى علي بلورات ذات شكل بطروخي مغطاة بطبقات من الكالسيت ، وكل بللورة تحتوى بداخلها علي حبيبات رمل أو بقايا صخور روسوبية أو نارية.

٢. بللورات الكالسيت الموجودة في هذا الحجر تتراوح بين البللورات الكبيرة الحجم وصغيرة الحجم والتي تحصر بينها فراغات مختلفة مما يجعل هذا النوع من الحجارة لا يتمتع بصلادة عالية.

٣. يتميز هذا الحجر بوجود مركبات عضوية بأشكال مختلفة بين مكونات الحجر.

٢) هضبة أبو رواش Abu Roash Palteau

استخدمت هذه الهضبة محلياً في أعمال البناء المصرية القديمة حيث أن الأحجار الجيرية التي اقتطعت من هذه الهضبة استخدمت في تشييد هرم الملك "جدف رع" من الأسرة الخامسة في هذه المنطقة وهضبة أبو رواش تكونت جيولوجياً في زمن Turonian ويبلغ سمكها حوالي ٢٢م ويتميز الحجر الجيري في هذه الهضبة بعدة ميزات أهمها :

مميزات أحجار أبو رواش : يتميز هذا الحجر بوجود المكونات الآتية

١. أن بللورات الكالسيت تتميز بحجمها المتناهي في الصغر (أقل من ٢ ميكرون).

٢. تنتشر المكونات العضوية والحفريات ذات الأشكال المختلفة بين مكونات هذا الحجر.

٣. وجود معادن الطفلة بين مكونات هذا الحجر.

٣) هضبة أهرامات الجيزة Giza , Plateau

كانت هضبة الجيزة الرئيسي الذي اقتطعت منه الأحجار الجيرية التي استخدمها المصريون القدماء في تشييد أهرامات الجيزة وغيرها من المقابر الموجودة بالمنطقة كما نحت تمثال أبو الهول في الجزء الغربي لهذه الهضبة.

ولا شك أن هذه الهضبة قد تعرضت لتغيرات جيولوجية هامة تركت بصماتها علي مكونات الحجر الجيري في هذه الهضبة ومن أهم هذه التغيرات ما يلي:-

أ- تسرب بللورات الدولوميت بين مكونات هذا الحجر لذلك يعرف الحجر الجيري في هذه الهضبة بالحجر الدولوميتي Dolomitic Limestone.

ب- تسرب محاليل السليكا حيث ينتشر وجود بللورات الكوتز بين مكونات هذا الحجر.

ج- إعادة تبلور هذا الحجر.

والواقع أن هذه التغيرات الجيولوجية لم تكن قاصرة علي هذه الهضبة وإنما تركت آثارها السابقة في مكونات الحجر الجيري الموجود بهضبة أبو رواش ومحاجر سقارة وجبل المقطم وقد ثبت أن هضبة الجيزة ومحاجر سقارة وجبل المقطم تتصل مع بعضها عند القاعدة وقد تكون الجزء العلوي لهضبة

الجيزة في زمن Lute – tian aga أما الجزء السفلي فقد تكـــون فـــي زمـــن Middle Eocene ومن أهم مميزات الحجر الجيري في هذه الهضبة ما يلي:–

مميزات الحجر الجيري في هضبة الجيزة :–

١. البللورات المعدنية معظمها حجمها (أقل من ٢ ميكرون) وهـــي دقيقـــة وشديدة الترابط مع بعضها.

٢. بعض بللورات الحجر قد تركت أماكنها الأصلية مثل بعـــض بللـــورات الكالسيت نتيجة ما حدث من تغيرات جيولوجية في هذا الحجر.

٣. وجود بللورات معدنية مختلفة بين مكونات هذا الحجر.

٤. وجود بللورات الكوانز ذات أحجام مختلفة.

٤) محاجر الحجر الجيري في سقارة Saqqara Limestone

وتعتبر هذه المحاجر من أقدم المحاجر التي استخدمت في أعمال البنـــاء القديمة في مصر حيث استخدمت كتل الحجر الجيري في سقارة في تشييد أقـــدم بناء في التاريخ شيد من حجر وهو هرم زوسر من الأسرة الثالثة.

وقد تكونت هذه المحاجر جيولوجيا في زمن upper Eocene وتتصل هذه المحاجر عند القاعدة بهضبة الجيزة وجبل المقطم مما يجعلنا نعتقد أن هـــذه المحاجر قد تكونت في أزمنة جيولوجية متقاربة وخضعت كما أسلفنا للتغيـــرات الجيولوجية المختلفة التي سبق الإشارة إليها عند الحديث عن محـــاجر الحجـــر الجيري في هضبة أبو رواش والجيزة.

ويعتبر الحجر الجيري في سقارة من الأحجار الجيرية التي تكثر بهـــا نسبة الشوائب المعدنية مثل حبيبات الكوارتز والولوميـــت وكـــذلك المكونـــات

العضوية من لذلك يطلق علي هذه الأحجار مصطلح Claye Limestone "أي الحجر الجيري الطفلي".

٥) جبل المقطم Mokattam Fomation

يشغل هذا الجبل المناطق التي تقع شرق قلعة صلاح الـدين الأيـوبي ويعتبر من الجبال التي لعبت دوراً هاماً في أعمال التشـييد خـلال العصـرين القبطي والإسلامي. إذ اقتطعت من هذا الجبل معظم كتل الحجر الجيري التـي استخدمت في تشييد الكنائس القبطية بمصر القديمة وحصن بـابليون ومعظـم مساجد الفاطميين والأيوبيين والمماليك والعثمانيين بمدينة القاهرة.

وترسيبات الحجر الجيري المقطم تعلو ترسيبات الحجر الجيـري فـي المنيا وقد تكونت الأجزاء السفلي بجبل المقطـم فـي زمـن upper middle Eocene بينما أجزاؤها العليا قد تكونت في زمن Lowe upper Eocene.

ويتميز الحجر الجيري لجبل المقطم باللون الكريمي أو الرمادي وفـي بعض الأجزاء يتميز باللون الأصفر الداكن. ويمكن القول بأن هذا النوع كمـن الأحجار الجيرية يتميز بصلادته العالية وقلة ما به من شوائب ودرجة مساميته المنخفضة ولهذه الأسباب أقبل عليه المصـريون خـلال العصـرين القبطـي والإسلامي وأستخدموا أحجاره في مبانيهم المختلفة ويبلغ سـمكه هـذا الجبـل حوالي ١٣٣م. ويتصل عند القاعدة بهضبة الجيزة وأبو رواش ومحاجر الحجر الجيري بسقارة وقد تعرض لنفس التغيرات الجيولوجية التـي تعرضـت لهـا محاجر السابقة والتي سبق الإشارة إليها في حينها.

٦) محاجر طرة والمعصرة Tura and Ma,asara quarries

استخدمت كتل الأحجار الجيرية التي نقلت من هذه المحاجر منذ الأسرة الثالثة في تكسية الهرم المدرج الذي شيده الملك زوسر بسقارة كما اسـتخدمت

هذه الكتل لنفس العرض في تكسية أسطح الأهرامات الثلاثة التي شيدها ملـــوك الأسرة الرابعة خوفو وخفرع ومنقرع فوق هضبة الجيزة. وذلك لما تتمتع بـــه هذه الأحجار من مميزات جعلتها صالحة لهذه الأغراض مثل درجة الصـــلادة العالية وسطحها الناعم الأملس وخلوها من الشوائب ولونها الأبيض. وتعتبر هذه المحاجر امتداداً لتكوينات الحجر الجيري بمنطقة المعادي التي تعرف باسم Ma adi For ma – tiom والتي تكونت في زمن Upper Ĕocene.

ويتميز الحجر الجيري في محاجر المعادي بلونه الضارب للأصـــفرار واللون الرمادي وفي بعض الأجزاء يتميز الحجر الجيري بلونه المائل للبنـــي. كما يتميز هذا النوع من الأحجار باحتوائه علي أنواع مختلفة مـــن الحفريـــات والمكونات العضوية المختلفة وأن بللورات الكالسيت تتميز بحجمها الصغير إذا ما قورنت ببلورات الكالسيت الموجودة في أحجار الحجر الجيري بجبل المقطم وهضبة الجيزة ومحاجر سقارة.

٧) محاجر الحجر الجيري في تل العمارنة

Tell EL Amarna Limestone

تنسب هذه المحاجر إلي تكوينات الحجر الجيري بالمنيا التي تعرف باسم Minia Formation والتي يبلغ سمكها حوالي ٨٠م وقد نحت مقـــابر الأســـرة الثامنة عشرة في زمن اخناتون داخل محاجر تل العمارنة.

ويتميز الحجر الجيري في تل العمارنة باحتوائه علي نسبة عالية مـــن الشوائب مثل معادن الطفلة وحبيبات الكوارتز والحفريات المختلفة. كما تكونـــت محاجر الحجر الجيري في هذا التل في زمن Lower / Middle / Eocene.

ويمكن القول بأن لون الحجر الجيري في هذا التل يتراوح بـــين اللـــون الكريمي والمائل للأصفرار بالإضافة إلي اللون الأبيض في بعض الأجزاء.

٨) جبل القرنة Qurna quarry

ينتمي هذا الجبل إلي تكوينات الحجر الجيري في طيبة "الأقصي والتي يطلق عليها" ومصطلح Thebes Formation والتي تكونت في زمن Lower Eo – cene ويشغل جبل القرنة الضفة الغربية لنهر النيل في قرية بالأقصر حيث نحتت في هذا الجبل كثير من مقابر ملوك وملكات ونبلاء الأسرات المصرية الثامنة عشرة والتاسعة عشرة والعشرون والحادية والعشرون.... الخ.

كما نحت في هذا الجبل الجزء الخلفي لمعبد الدير البحرى الذي شيدته الملكة حتشبسوت من الأسرة الثامنة عشرة.

ويتميز هذا النوع من الحجر باحتوائه علي نسبة عالية من معادن الطفلة التي يزيد حجمها عندما تتشرب كميات كبيرة من مياه الأمطار وغير من مصادر الرطوبة المختلفة فتشكل ضغطاً خطيراً بين مكونات الأحجار مما يؤدي إلي تشرخ جدران المعابد والمقابر المنحوتة في هذا الجبل كما يتميز هذا الحجر بلونه الكريمي و الرومادي والأخضر.

ولاشك أن الحجر الجيري في هذا الجبل يحتوي علي العديد من الشوائب المختلفة مثل الحصي وحبيبات الكوانز كما أن بللورات الكالسيت تتميز بحجمها الصغير ومعظمها قد تكون داخل الفوالق والشقوق الموجود بالحجر كما يحتوي هذا الحجر علي العديد من أنواع الحفريات المختلفة.

ثانياً : محاجر الحجر الرملي :

لعل من أهم محاجر الحجر الرملي التي لعبت دوراً بارزاً في أعمال البناء القديمة في مصر جبل السلسلة الذي يقع بين ادفو وأسوان ومحاجر الحجر الرملي بادفو أما محاجر الحجر الرملي الأخرى فما زالت بحاجة إلي دراسة أثرية وعلمه تطبيقية تكشف النقاب عن دورها في أعمال البناء القديمة:

(١) الجبل الأحمر Gebel Ahmer

يشغل هذا الجبل المناطق التي تقع شرق مدينة القاهرة حتى مدينة السويس وقد تكونت ترسيباته فوق الترسيبات الحجرية التي تكونت في زمن upper Eocene أما هذا الجبل فقد تكون في زمن oligigcene.

ويتميز الحجر الرملي في هذا الجبل باحتوائه علي بللورات الكوارتزيت المتحولة عن الحجر الرملي ذات الألوان المختلفة التي من أهمها الرمادي والمائل للأحمرار وفي بعض الأجزاء يتميز الحجر بلونه الأصفر.

وحجر الكوارتزيت يعتبر من الأحجار المتحولة التي تتميز بصلادتها العالية إلا أن الأحجار في الجبل الأحمر لم تتحول تحولاً كاملاً لأن حبيباتها ما زالت ترتبط باكسيد الحديد اللامائي Heamatite كما يتميز هذا الحجر باحتوائه علي بقايا نباتية مختلطة بالسيليكا وخاصة جذوع الأشجار السلسليكية Siliceous tree trunks كما يمكن القول بأن سمك هذا الجبل يبلغ حوالي ٥٠٠ متر.

ولا شك أن كتل الأحجار التي اقتطعت من هذا الجبل قد استخدمت في أعمال البناء القديمة وخاصة في الكنائس القبطية بمصر القديمة والعديد من المساجد الإسلامية بمدينة القاهرة إلا أن تمثالي ممنون Colossi of Memnon القائمين بالضفة الغربية لنهر النيل في قرية القرنة بالأقصر يعتبران أبلغ دليل علي استخدام حجر الكوارتزيت الرسوبي أخذ من هذا المحجر في صنع بعض التماثيل الفرعونية.

(٢) جبل السلسلة Gebel EL Silsilah

(٣) محجر ادفو Edfu quarries

يعتبر هذان المحجران من أهم مصادر الأحجار الرملية التي لعبت دوراً هاماً في تشييد العديد من المعابد المصرية القديمة في مصر العليا مثل معبد الكرنك ومدينة هابو والرمسيوم كما استخدمت محاجر الحجر الرملي بادفو في تشييد معبد حورس بادفو ومعبد اسنا ومعبد كوم امبو.

ويمكن القول بأن هذه المحاجر تنتمي إلي تكوينات الحجر الرملي النوبي الذي يعرف باسم Nubian Formation والواقع أن الحجر الرملي الرملي النوبي يشغل بعض مناطق مصر العليا وقد تكون هذا النوع من الحجر في زمن Cretaceous وكذلك Cenomanian ويبلغ سمك جبل السلسلة حوالي ١٤٠م ولا نعرف حتى الآن سمك محاجر الحجر الرملي بادفو ويعتبر الحجر الرملي في تلك المحاجر أقل صلادة من حجر الكوارتزيت الموجود في الجبل الأحمر وذلك لأن المادة الرابطة التي تربط بين حبيبات الكوارتز في هذه المحجرين هي مادة كربونات الكالسيوم وهي أقل صلادة من اكسيد الحديد (الهيماتيت) كما أن الحجر الرملي في تلك المحاجر يتميز بمساميته العالية ولذلك فإن هذا النوع من الأحجار يمتص كميات كبيرة من المياه الأرضية والتي لعبت دوراً هاماً في تلف كثير من المعابد التي شيدت بكتل الأحجار الرملية التي جلبت من جبال السلسلة وادفو.

ويحتوى الحجر الرملي في تلك المحاجر علي معدن الكوارتز وهو معدن أساسي بالإضافة إلي كربونات الكالسيوم ومعادن الطفلة.

الصخور المتحولة : Metamorphic Rocks

الصخور المتحولة هي صخور طرأت عليها تغيرات فيزيائية (الحرارة أو الضغط أو كليهما) وكيميائية، وتعرف عملية التحول بأنهـا العمليـة التـي بموجبها بتغير الصخر الأصلي بواسطة العوامل الفيزيائية أو الكيميائيـة الـى صخر جديد له خواص جديدة فعندما يتحول الصخر الراسب إلى صخر متحول فإنه يصبح أشد صلادة وأكثر تبلورا. أما الصخر الناري فإنه عندما يتحول يفقد شكله الذى يميزه بأنه ناري (البلورات موزعة بإنتظام) ويكسب شكلا أخر يتميز بوجود البلورات مرتبة فى خطوط متوازنة تقريبا.

أسباب التحول: Causes Of Metamorphism

تعتبر الصخور النارية إنتاج للعمليات الداخلية للأرض بينما الصـخور الرسوبية نتاج للعمليات الخارجية وقد يتعرضان لبعض الظروف الجديدة مثـل تغير درجة الحرارة أو الضغط مما قد يتسبب عنه تغير التركيب المعدني وكذلك تغير النسيج وتعرف هذه العملية بالتحول Metamorphism والتى من أسباب حدوثها ما يل:

١ – التنشيط الكيميائي بواسطة السوائل:

Chemical Reactivity Induced By Fluids

توجد الوسائل المائية بين مسام الحبيبات فى الصخور الرسوبية وهـذه السوائل تلعب دورا هاما وحيويا فى عملية التحول حيث يذاب فيها كميات مـن ثاني أكسيد الكربون والأملاح مثل كلوريد الصوديوم، وبعض المكونات المعدنية مثل الكوارتز وهو يعمل على الإسراع من معدل التفاعلات الكيميائية وعنـد زيادة درجة الحرارة والضغط تتحول المعادن المائيـة Hydrous Minerals

مثل الكلوريت والطفلة الى المعادن الغير مائية Anhydrous Minerals مثـل الفلدسبارات والبيروكسينات.

٢- الحرارة : Temperature

عندما تتعرض الصخور لدرجة حرارة عالية فإن هناك معادن جديـدة سوف تتكون نتيجة سلسلة التفاعلات الكيميائية التي تنشطها درجـة الحـرارة العالية.

ومصادر الحرارة العالية تكون ناتجة من داخل الأرض وعنـد تـداخل الصخور النارية فى الصخور الرسوبية واندفاعها فيخالا يؤدى ذلك الى تغيـر درجة الحرارة والضغط وبالتالي تكون معادن جديدة وتحول الصخور الرسوبية الى صخور متحولة.

٣- الضغط: Pressure

يعتمد التركيب المعدنى للصخور المتحولة على درجة الحرارة والضغط المرتفعين كما أن الضغط يؤثر على نسيج الصـخور حيـث ينـتج النسـيج الصفائحى لمعادن مثل الميكاو الكلوريت .

٤- الزمن: Time

كل التفاعلات الكيميائية تحتاج الى مدة معينة من الزمن لإنجازها بعض هذه التفاعلات يحدث بسرعة وبعضها الأخـر يحتـاج الـى ملايـين السـنين والتفاعلات الكيميائية التي تحدث فى الصخور تنتمي للنوع الأخير وقد أجريت تجارب عديدة فى المعمل أثبتت أن الحرارة العالية والضغط العـالي والوقـت الطويل تنتج حبيبات معدنية كبيرة وأن الحرارة المنخفضة، والضغط المنخفض، ووقت تفاعلي قصير تنتج صخورا ذات حبيبات دقيقة.

أنواع التحول: Kinds Of Metamorphism

١- التحول التماسي أو الحراري : Contact Or Thermal Metamorphism

والتحول التماسي أو الحراري يحدث لإندفاع الصخور النارية فى القشرة حيث يحدث ارتفاع فى درجة الحرارة والتى قد تتجاوز ١٠٠٠° م وعلى ذلك فإن الصخور المجاورة للسد تسخن وتتحول وتتوقف درجة تحولها على حجم الجسم الناري المندفع ودرجة الحرارة المرتفعة وعلى التركيب المعدني له ومن أمثلتها تحول الحجر الرملي إلى الكوارتزيت والحجر الجيري الى الرخام.

٢- التحول المدفون: Burial Metamorphism

عند دفن الصخور الرسوبية مع الصخور البركانية على أعماق كبيرة يمكن أن ترتفع درجة الحرارة كما أن وجد السوائل بين حبيبات الصخور الرسوبية يعمل على تنشيط عمليات التحول للمعادن، وعائلة المعادن التي تميز حالات التحول المدفون هي عائلة معادن السليكات

٣- التحول النطاقي أو الإقليمي: Regional Metamorphism

ويشمل أكثر الصخور المتحولة الشائعة لشموله على مساحات كبيرة تتعدى آلاف الكيلو مترات المربعة وعلى ذلك يسمى بالتحول الإقليمي ولا يشمل على التشويه الميكانيكي وصخور التحول الإقليمي الى النسيج الصفائحى وتكون طبقاتها قوية.

تقسيم الصخور المتحولة : Classification Of Metamorphic Rocks

يمكن تقسيم الصخور المتحولة إلى:

١-الصخور المتحولة بالحرارة :

Thermally Metamorphosed Rocks

وهى الصخور الناتجة عن التحول الحراري وينتج عنها معادن جديـــدة تعرف بالمعادن المتحولة بالحرارة ونسيج الصخور المتحولة بـــالحرارة نســـيج حبيبي (البلورات متداخلة وموزعة بلا انتظام)

ومن أمثلتها تحول الحجر الجيري وتبلوره من جديـــد مكونـــا صـــخر الرخام.

٢- الصخور المتحولة الحركية: **Dynamic Metamorphic Rocks**

وتوجد هذه الصخور فى مناطق الفوالق وأسطح الإنزلاقات حيث يحدث على طوال هذه الفوالق والإنزلاقات حركة كبيرة نسبيا تصاحبها عملية تبلور فى الصخور وفى حالات نادرة وقد يحدث إنصهار جزئي وهذه العمليات تنتج أنواع مميزة من الصخور ومن أهم أمثلتها الأردواز التكتوني أو ما يدعى بالفيلونايت Phyllinite

٣- الصخور المتحولة إقليميا: **Regionally Metamorphosed Rocks**

والصخور الناتجة عن التحول الإقليمي تتميز معادنها بأنهـــا متبلـــورة ومصطفة بلورتها فى صفوف متوازية وتعتبر الخاصية الصفائحية أهم خاصية تميز نسيج هذا النوع من الصخور المتحولة إقليميا وتختلف نوعيـــات المعـــادن المتكونة على حسب درجة الحرارة والضغط فمن المعادن التي تتكـــون تحـــت ظروف الحرارة والضغط المنخفضين: المســـكوفيت والكلوريـــت والكـــوارتز والبيوتيت أما الكيانيت والسيليمنيت والجارنت الأوليجوكليز فإنها تتكـــون فـــي ظروف الحرارة والضغط الشديدين.

ومن أمثلة الصخور المتحولة إقليميا الشست والنيس والأردواز.

أنسجة الصخور المتحولة : Texture of metamorphoc Rocks

يمكن تقسيم الصخور المتحولة الى ثلاثة أنواع على حسب أنسجتها (ترتيب الحبيبات مع بعضها البعض) إلى:

١ - متورقة: Foliated

وتتكون هذه الصخور من نسبة عالية من المعادن الصفائحية (الميكا) وتكون معادنها مرتبة ومتوازية كما فى الشكل (٢أ)

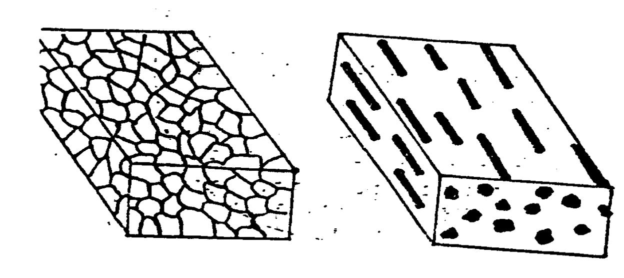
٢ - مخططة: Lineated

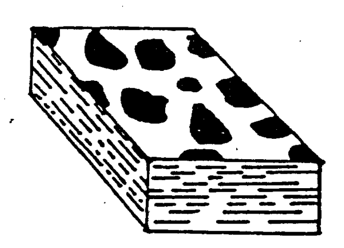
تتكون هذه الصخور من نسبة عالية من المعادن القضبية الشكل Rod أو المتطاولة أو الليفية والتى تأخذ ترتيب خطي بحيث تشير محاورها Link الطولية الى اتجاه واحد .

٣ - محببة: Granoblastic

تتكون هذه الصخور من معادن حبيبية ليست صفائحية أو متطاولة مثل الكوارتز أو الكالسيت وتشكل معادنها فيما بينها حبيبات متلاصقة معشقة مع بعضها البعض شكل (٢جـ) ويقتصر وجود الصخور المتورقة والمخططة فى التحول الإقليمي فقط لأنها ناتجة عن الضغط والحرارة كما أن التركيب المعدني لهذه الصخور غالبا ما يكون معقدا بحيث يتكون الصخر الواحد من أكثر من معدن هذا بالإضافة إلى أن التركيب المعدني لهذه الصخور يتغير بتغير درجات الضغط والحرارة وتنشأ الصخور المحببة أو الحبيبية بواسطة التحول التماسي أو الإقليمي والسبب الرئيسي فى ذلك أن تلك الصخور تتركب فى الغالب من معدن واحد مما يؤدى ذلك الى عدم تكون معادن صفائحية أو متطاولة تعطي

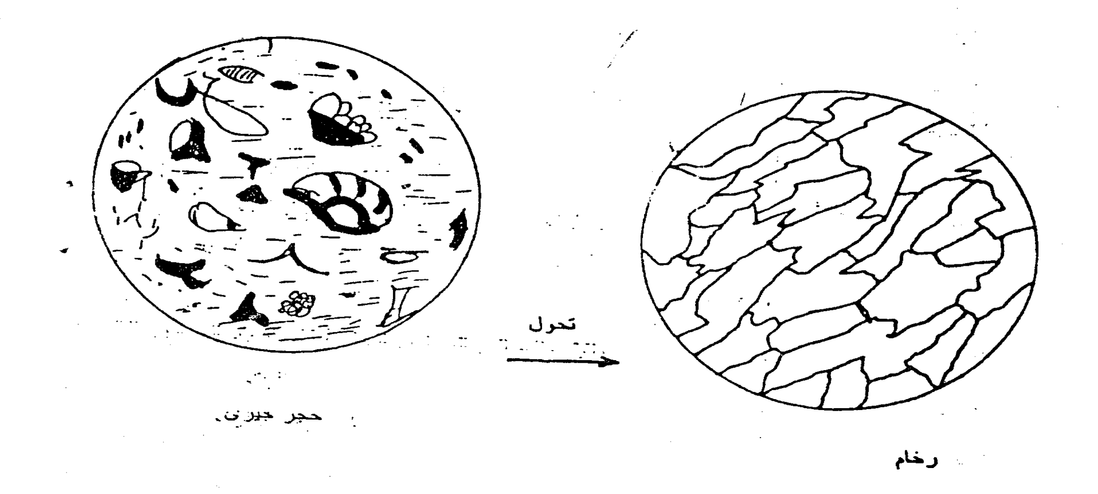
النسيج المتورق أو المخطط ويستثنى من ذلك صخر الهورنفلس فقط من بين الصخور الحبيبية لأن تكوينه يقتصر على التحول التماسى.





شكل (٢) يوضح أنسجة الصخور المتحولة

عن محمد عبد الغني شرف ١٩٩٣



شكل (٣) يوضح تحول الحجر الجيري الى رخام

عن **Francis Dimes** عام ١٩٩٠ م

<u>أهم معادن الصخور المتحولة :</u> Metamorphic

يكون المعدن تحت ظروف خاصة مثل درجات الحرارة والضغط وعند ارتفاع درجة الضغط والحرارة تبدأ المعادن السابقة التكوين فى التغير تـــدريجيا الى معادن أخرى أكثر ثباتا تحت الظروف الجديدة ونتيجة لتغير المعادن تتغير كذلك الصخور لذلك نجد الصخور المتحولة تتركب أساسا من مجموعتين مــن المعادن:

أ- معادن متبقية فى الصخور المتحولة أصلها فى الصخور قبل التحول

ب-معادن تكونت أثناء ونتيجة التحول

الكوارتز على سبيل المثال يظل ثابتا جدا ولا يتغير تحت أعلى درجات التحول وعلى العكس من ذلك فإن معادن الطين تتحول الى معادن جديدة (مثـل معدن الكلوريت) تختلف بإختلاف ظروف التحول وتوضح القائمة التالية أهـم المعادن الشائعة فى الصخور المتحولة.

١- كوارتز ٢- كالسيت ٣- فلسبار ٤- كلوريت

٥- بيوتايت ٦- مسكوفيت ٧- جارنت (المتداين)

٨- اشترولايث

بالإضافة الى المعادن السابقة فقد توجد المعادن التالية فـى بعـض الصـخور المتحولة وهذه المعادن هي

١- تلك ٢- جرافيت ٣- أبيدوت ٤- تريموليت

٥- اكتينوليت ٦- ولاتستوليت ٧- كورديريت ٨- اندلوسايت

وينتج الرخام من عمليات التحول المختلفة والتى من أهمها عمليـات التحـول الحرارى التى تحدث للصخور الجيرية.

<u>التحول الحرارى للصخور الجيرية:</u>

الصخور الكربوناتية سريعة التأثير بعملية التحول وذلك لقابلية معادنها وسهولة إعادة تبلورها تحت ظروف إرتفاع معدلات درجات الحرارة والضغط مكونة الرخام (شكل٣) ذا الكالسيت المتبلور ونظرا لان الصخور الجيرية غالبا

ما تحتوى على المواد السليكاتية والمعادن الطينية (سليكات الألومنيوم) والتـى تؤثر على نوعية المعادن المتحولة وبالتالي تكون صخورا مختلفة.

١- ففي حالة وجود شوائب مثل الكوارتز وعند درجات الحرارة المرتفعـة والضغط المنخفض ممكن أن يتفاعل الكالسيت مع الكـوارتز الموجـود لإنتاج سليكات الكالسيوم (ولاستونيت) Wollastonite والتفاعل الأتي يوضح عملية تكوين الولاستونيت وهى شائعة فى الصخور الكربوناتية

$CaCo_3 + SiO_2 \longrightarrow CaSio_3 + Co_2$

Calcite Quartz Wollastonite Fluid

٢- وفى حالة وجود شوائب من سيليكات الألومنيوم المائيـة مـع الحجـر الجيرى وتحت ظروف عالية من درجة الحرارة يتكون معدن الأنورثيت تبعا للمعادلة الأتية

$CaCo_3 + Al_2O_32SiO_22H2O \longrightarrow CaAl_2SiO_2O_3 + CO_2+2H_2O$

Calcite Kaolin Anorthite

٣- أما فى حالة وجود شوائب من السـيليكا والألومنيـوم مـع صـخور الدولوميت فإنه قد يحدث تفاعل الماغنسيوم مع السيلكا فينـتج بعـض معادن الأمفيبول والبيروكسين والأوليفين بالإضافة الى معدن الكالسيت وتتكون صخور الهورنفلس السليكاتية وفي حالة كمية أكبر من السيليكا يتكون الدايوبسيد بدلا من الفورشتيريت كما فى المعادلة

$CaMg\ (Co_3)_2 + 2SiO_2 = CaMg\ (SiO_3)_2 + 2Co_2$

Dolomite Silica Diopside

وبتسخين الدولوميت النقي تحت ضغط منخفض نسبيا ينتج عنه تحلـل كربونات الكالسيوم مع تبلور الكالسيت

$CaMg\ (Co_3)_2 \longrightarrow CaCo_3 + MgO + Co_2$

وقد سميت عملية تحطيم الدولوميت وإعادة تكـوين الكالسـيت بعمليـة تغيـز الدولوميت Dedolomizisation وبتميا البيركليز فى الحال ليكون البيروسيت (MgO. OH) والنتيجة النهائية للتغير هي رخام بيروسيتى وتسهل عملية تغير الدلوميت فى حالة وجود شوائب سيلسية وطفلية وينتج عن التحـول التماسـى أنواع مختلفة كثيرة لمعادن جديدة وذلك على حسب نوع الشـوائب الموجـودة ودرجة الحرارة والضغط مما تؤدى الى تغير التركيـب المعـدنى للصـخور وبالتالي تغير ألوانه

تقسيم الرخام: Classification of Marble

يقسم الرخام إلى أنواع عديدة حسب تركيبه المعدنى إلى

١- الرخام الجرافيتى Graphite Marble

٢- الرخام التريموليتى Tremolite Marble

٣- الجرلم الجرافيتى التريموليتى Tremolite – Graphite Marble

٤- الرخام الفورشتيرى التريموليتى Tremolite – Forsterite Marble

٥- طبقات الرخام مع روابط الهورنبلند الشيستى Banded Hornblend Schist With Marble Laminae.

٦- الرخام الكوارتزى Quartz Marble

٧- الرخام النقي Pure Marble

أولا: الرخام الجرافيتى Graphite Marble

يعتبر الرخام الجرافيتى من اغلب الأنواع السائدة فى منطقة أبو سويلى فى الصحراء الشرقية وهذا الرخام يختلف فى لونه ما بين الرمادى الى الأسود الرمادى وعامة فإن مادة الجرافيت تنتشر بتجانس أو تشكل بقع غيـــر منتظمـــة وفى بعض الأحيانتكون شرائط والرخام الجرافيتى يتكون أساسا من الكالســيت مع الدلوميت ونسبة من الجرافيت.

ثانيا: الجرام الجرافيتى التريموليتى Tremolite – Forsterite Marble

وهذا الرخام لونه رمادى يميل الى الأبيض وحجم حبيبات الكربونـــات يتراوح من الدقيق الى الخشن وهو يتكون أساسا من الكالسيت والدلوميت وكمية قليلة من الجرافيت بالإضافة الى التريموليت

ثالثا: الرخام التريموليتى Tremolite Marble

ويتراوح لونه من الأبيض الى الأصفر ويتكون أساسا مـــن الكالســـيت، التريموليت، الدلوميت، كمية قليلة من الكوارتز، الأكتوليت، فليجوبيـــت بكميـــة نادرة.

رابعا: الرخام الفورشتيرى التريموليتى

Tremolite – Forsterite Marble

والرخام الفورشنيرتي التريموليتى يتراوح لونه من الرمادى الى البنـــى الى الأخضر المصفر وغالبا فإن حجم الحبيبات يتراوح من المتوسط الى الدقيق وهو يتكون أساسا من الكالسيت والدولوميت متحـــدين مـــع التريموليـــت أمـــا ألفورشتيريت فيوجد كبلورات مشروخة والتى تتحول جزئيا الى السربنتين عند حدودها وشروخها مكونة الرخام السربنتينى ويمكن توضيح تكـــوين صـــخور الرخام الفورشتيرتى بالمعادلة الأتية:

$$2CaMg(CO_3)_2 + SiO_2 \longrightarrow 2CaCO_3 + Mg_2SiO_4 + 2CO_2$$

Dolomite Silica Calcite Forsterite

خامسا: طبقات الشست الهورنبلندي المتبادل مع الرخام:

ويعتبر أقل شيوعا بالمقارنة بالأنواع الأخرى والوجود الرئيسى له فى وادى حيمور بالصحراء الشرقية وهذا الرخام يتكون من طبقات الشست الهورنبلندى متناوبة مع أحزمة متوسطة من الكربونات وهى تتكون أساسا من الكالسيت والهورنبلند والاكتينوليت، والكوارتز، وكمية قليلة من الفلدسبارت، والمعادن المعتمة.

سادسا: الرخام الكوارتزى Quartz Marble

ويوجد فى جنوب منطقة أبو سيلى وهو يتكون أساس من الكالسيت والكوارتز وبعض المعادن المعتمة.

سابعا: الرخام النقي Pure Marble

وهو يتكون من الكالسيت والدلوميت مع مية قليلة من أكاسيد الحديد وكسر السليكات

محاجر الرخام Marble Quarries

ويوجد نوعان من المحاجر هما المحاجر المحليـــة Local Quarries وهى المحاجر التى توجد داخل مصر والمحاجر الأجنبية Foreign Quarries وهى المحاجر الموجودة خارج مصر والتى استورد منها الرخام عـــن طريـــق التجارة.

أولا: المحاجر المحلية Local Quarries

وتقتصر أماكن وجود الرخام فى مصر على الصحراء الشرقية بوجـــه خاص (خريطة٤) فقد سجل وجوده فى عدة أماكن فى هذه الصحراء فـــى وادى الديب (غرب جبل الزيت) فى موضع قريب من ساحل البحر الأحمر وفى جبل الرخام (بالقرب من وادى المياه) كما جلب الرخام من وادى حيمور لعمل بعض التماثيل خلال الأسرتين الثامنة عشرة والتاسعة عشرة كما وجد فى بنى شعران فى أقصى الصحراء الشرقية وذلك خلال العصور الإسلامية وهـــذا مـــا أكـــده القلقشندى كما يقع فى أقصى جنوب الصحراء الشرقية موضع لإستحراج للرخام الرمادى الضارب الى الصفرة لم يستعمل قديما ويسمى وادى العلاقى كما يوجد فى أدفو كما كان يأتي الرخام الأحمر والأخضر السماقى من محاجر أسوان الى الفسطاط وقد ثبت من المصادر التاريخية أن مدينة أسوان كانت من أكثر مـــدن مصر ثروة فى مجال المحاجر الرخامية حيث أشار يـــاقوت الحمـــوى أن فـــى جبالها مقطعا للرخام وأيد ذلك المقريزى ويصف ابن أياس ما اشتهرت به مصر فى العصور الإسلامية من حيث وجود مقاطع الرخام الأبيض والأسود السويسى والرخام السماقي.

وهذا ما أوردته المصادر التاريخية عن محاجر الرخام فى مصر وفيما يلى سوف يتم استعراض محاجر الرخام الموجودة فى مصر والمستغلة حاليـــا

سواء التى ذكرتها المصادر التاريخية أو التى لم تذكرها فربما كان قد اســتغل بعض منها قديما ولم تذكره المصادر التاريخية.

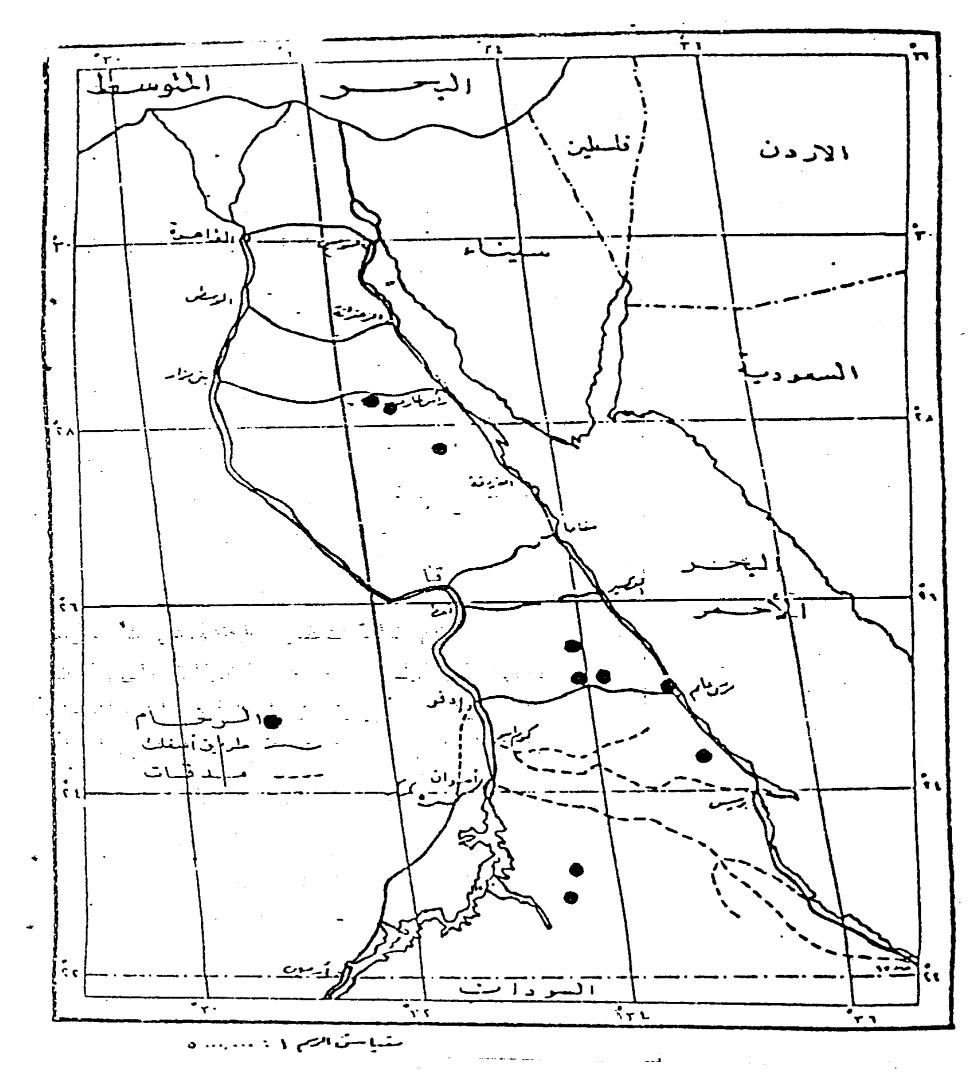
١ – رخام منطقة أبوسويلى: Abu Swayel Area

تقع منطقة أبوسويلى جنوب الصحراء الشرقية المصرية بــين خطــي عرض ٤٠ ٢٢° ، ٥٠ ٢٢° شمالا وخطى طول ٢٩ ٣٣° ، ٣٩ ٣٣° وتتكون هذه المنطقة من طبقات متقطعة من الرخام تأخذ الأتجاه العام الشمالي الشــرقى والجنوب الغربي ويوجد بها حوالى سبعة أنواع كما ذكرها حسان عام ١٩٧٨م

وهــم الرخـــام الجرافيتـــى، التريمـــوليتى، الجرافيتـــى التريمـــوليتى، الفورشينرتى التريموليتى، الكوارتزي، الرخام النقى كما أنها تحتوى على طبقات الرخام المتبادل مع طبقات الشست الهورنبلندى.

وتختلف حزم الرخام فى اللون والتركيب متبادلا مع بعضـــها الـــبعض والأكثر شيوعا الحزم الرمادية بينما البيضـــاء والكريمـــة والأخضـــر المائـــل للإصفرار أقل وضوحا والرخام عادة دقيق الحبيبات ولكنه فى بعض الأحيـــان حبيبات خشنة ودائما يتغير الفورشتيريت الى السربينتن على ذلك ينتج الرخـــام الأخضر المائل للإصفرار و أغلب النوع السائد فـــى المنطقـــة هـــو الرخـــام الجرافيتى والذى يكون لونه رماديًا وتشير الفحوص المعملية الى أن الرخام قـــد لنتج فى المنطقة بواسطة التحول لأوجه الأمفيبولات للأحجار الجيرية غير النقية والشوائب الرئيسية هي:

Magnesium, Ferruginous, Siliceous and Carbonaceous Materials



مقياس الرسم ١ : ٥٠٠٠٠٠٠

خريطة رقم (٤): توضح أهم محاجر الرخام المحلية

وقد تم قياس الأعمار النظائرية بطريقة الربيدوم – استرنشيوم لصخور منطقة أبوسويلى ويتضح من هذه القياسات أنها تتراوح من + ١٢٠٠ مليون الى + ٦٠٠ مليون سنه وهذا يتمشى مع الحركة الأخيرة من حقب ما قبل الكمبرى

٢ – منطقة الدغبج – الجندي: El-Daghbag-El-Gindi District

تقع منطقة الدغبج – الجندى فى الصحراء الشرقية بين خطي عـرض ٧٠ °١٧، ٢٥ ، ٣٠ ٢٥ شمالا وبين خطى طول ٤٦ ٣٣ ٣٤ شرقا وتعطى هـذه المنطقة مساحة قدرها ٥٣٠ كم٢ وقد سميت نسبة الى وادى الدغبج والجنـدى أهم واديين بالمنطقة وهما فرعان من وادى المياه ويعتبـر الرخـام مـن أهـم الخامات المعدنية بالمنطقة وتقوم بإستغلاله شركة مصـر للمنـاجم والمحـاجر ويوجد الرخام على شكل طبقات تتخللها طبقات الشست وهو ذو لـون أبـيض مصفر ويحتوى على عروق ذات ألوان جميلة بنفسـجية وسـوداء ورماديـة. والدراسة البتروجرافية لهذا الرخام أثبتت أنه من الرخام الكلسى.

٣- رواسب جبل الرخام: Geble El-Rukham Marble Deposits

وهذه المنطقة تقع بين خطى عرض ٢٧ °١٦ ، ٢٥ ، ١٨ °٢٥ ، خـط طول ٢٧. ٥٧ °٣٣ ، ٦٦ ٥٩ °٣٥ وتغطى حوالى ١١,٥ كم٢ وهذه المنطقـة تقع فى الحدود الشمالية الشرقية للبرلمية شرق وتتكون المنطقـة مـن تـلال متوسطة يمثل جبل الرخام أعلى تل فيها والذى يقع فى الشمال الغربى ورخـام المنطقة مظهره أبيض سكرى بحوى حزم ملونة جميله تختلف فى ألوانها بـين الأحمر ، الأصفر، الأخضر الباهت، الرمادى والأسود وهى تعطي ظلالا جميلة للرخام الأبيض اللبني وقد أجرى أمير عام ١٩٥٥ تحليلا كيميائيا على عينة من رخام المنطقة اتضح أنها تحتوى على كربونات كالسيوم، كربونات الماغنسيوم،

كلوريد الصوديوم، أكسيد الألومنيـوم والحديـديك، هيدروكسـيد الماغنسـيوم والكبريتات.

وقد جمعت كتل مقطعية رفيعة من الرخام بواسطة أمير عـام ١٩٥٥م ووجد بالفحص الميكروسكوبى أنها تتكون من الكالسيت والبيروسيت والأباتيت وبلورات الفورشتيريت

كما أن Marte عام ١٩٧٠ أجرى فحوصا ميكروسكوبية أخرى حيـث وجد أن الحزم المائلة للأخضر والرمادى الغامق تتكون أساسا مـن الدايوبسـيد والفورشتيريت وغالبا البلوناسيت Pleonaste أما الكالسيت مع الفورشـتيريت والبلوناست مع بلورات الأباتيت تكون الحزم الرخامية الرمادية اللامعـة أمـا الحزم الرخامية مع ظلال مختلفة الألوان حمراء فهي غنية بالسربنتين بالإضافة الى البيروسيت، الكالسيت وقليل من الفورشتيريت والبلوناست والأباتيت والعديد من الظلال المتنوعة للون الأحمر تختلف تبعا لدرجة التصبغ باكاسـيد الحديـد وبعض الحزم غنية بالفلوجوبيت Phlogopite وفى هذه الحالة يتكون الصـخر من الفلوجوبيت والكالسيت والبيروسيت وكمية صغيرة من البلوناسيت والأباتيت ويتغير معدن البيركليز الى معدن البيروسيت نتيجة عملية التميؤ كمـا جمعـت عينات من الحجر بينت الفحوص الميكروسكوبية بواسطة رامز ١٩٦٧ م أنهـا من الرخام البروسيتى وتعتبر الرسوبيات فى المنطقة أقدم صخور المنطقة كمـا جمعت عينات من المنطقة أثبتت الفحـوص الميكروسـكوبية بواسـطة رامـز ١٩٧١م أيضا أنها من الرخام الجرافيتى الشيستى

Graphite-Marble Schist

والذى يتكون من الكالسيت مع مواد جرافيتية

٤- وادي العلاقى – وادى المياه: Wadi Allaki & Wadi El-Miyah

يقع وادى المياه فى الصحراء الشرقية بالقرب من جبل الرخام بين خطي طول ٥٠ ٣٣ وخط عرض ٢٠ ٢٥ ، ١٠ ٢٥ ويوجد فيه الصخور الدلوميتية المتحولة والسليكية وهى تتكون من الكالسيت البيروسيت وهى تحتوى على حزم مكونة من المعادن الأتية : الدايوبسيد ، الفورشتيرت ، البلوناست والسربنتين. ويعتبر وادى المياه من المحاجر الرئيسية لإنتاج الرخام الأبيض أو السكري أو الرمادى أو الأسود.

٥- منطقة جبل الحسنات: Gebel El-Hisinat Area

تقع منطقة جبل الحسنات فى وسط الصحراء الشرقية جهة الغرب حيث يمر بها وادى المياه وقد احتوت الصخور الرسوبية على طبقات متنوعة من الرخام لونها أبيض أو أسود وقد وجد أن الرخام الاسود يحتوى على عدد قليل من حفريات دقيقة رملية الجدار تسمى

(Arenaceous Foraminifera)

وتتبع العصر الكربونى الأعلى وتغطى المنطقة حوالى ٢٢٠ كم٢ وهى تحد بين خط عرض ٤٨ ٢٠ ٢٥ ، ٢٤ ١٣ ٢٥ وخط طول ٥٠ ٣٣ : ٤٦ ٤٠ ٣٣ كما تحتوى على الرخام الجرافيتى كما تحتوى روابط الرخام على كمية من الحفريات

Arenaceous Pensylvian Foraminifera Comprising Endothera Media Endothyra Media Endo Thyracl and Meoreinella Biserialis

ويتكون من الكالسيت المتحد مع التريموليت واللون الأسود له ناشىء عن المواد الكربونية فى شكل جرافيت

٦- منطقة العنيجى:El-Inegi Area

تقع منطقة العنيجي فى الصحراء الشرقية بين خطى طول ١٥ ٥٨ ٣٣ ، ١٠ ٣٤° وخطى عرض ١٠ ٢٥° ، ١٨ ٢٥° شمالا وتشغل المنطقة كلهـا مساحة قدرها ٣١٠كم٢ وقد أخذت اسمها من أشهر وأعلى جبالها وهـو جبـل العنيجي

ويوجد الرخام على هيئة طبقات وعروق ذات ألوان بيضـاء ورماديـة وصفراء وسوداء ضمن صخور السربنتين والشست وبالفحص الميكروسـكوبى بواسطة مصطفى عام ١٩٥٤م وجد أن الرخام الأبـيض يتكـون أساسـا مـن الكالسيت والذى يمثل المكون الرئيسى للرخام بالإضافة ال بعض الشوائب مثل البيروسيت والذى ينتمي الى البيركليز منا ثبت أيضا أن اللون الرمادى والأسود يعزو الى وجود الجرافيت.

٧- منطقة وادى جيمور : Wadi Heimur Area

يقع وادى جيمور فى جنوب الصحراء الشرقية على بعد ٢٠٠ كم جنوب أسوان والمنطقة قد غطيت بواسطة الطيات الرسوبية والبركانية والتى ارتبطت بالرخام الأبيض والأسود والرمادي

ويحتوى الرخام الجرافيتى على نسبة رمليـة نـادرة لمثقبـات العمـر المسيسابنية (الكربونى الحديدى الأسفل) وهى.

Ammobaculites, Lituotubella el, Palocospiroplect Ammina CF Mellina, Trochammina and Endothyra

كما يوجد رخام أسود كربونى حديدى Carboniferous Black Marble

وذلك لوجود المواد الجرافيتية Graphitic Matter وتشتمل علـــى الفيوزيلنـــد Fusulinid ويتراوح سمك الرخام الحاوى عليه حوالى ٣م وهـــذه الحفريـــات تعيش فى بيئة الماء الصافى ذى الملوحة العادية.

٨- منطقة حماطة Hamata Area

تقع منطقة حماطة فى جنوب الصحراء الشرقية حيث يوجد الرخام فـــى وادى أم سليم والذى نتج عن التحول الإقليمى ويتراوح لون حزم الرخـــام مـــن الأخضر الشاحب الكريمة، المادى الباهت الى البنى ويتكون الرخام من سليكات – كالك معرقة – الهيماتيت Calc- Silicates Streaked With Hematie

وحزم السليكات – الكالك تتكون غالبا من الدايوبســـيد ســـكابوليت والمكونـــات المعدنية الصغرى فى الرخام هي الولاستونيت والبلاجيوكليز والإندوكريز

Wollastonite, Plagioclase Indocrase

فى جيوب داخل الجارنت

٩- منطقة رخام وادى أبو الترافية :

Wadi Abu Tireifiya Marble Quarriese

تقع فى المنطقة الى الغرب من جبل عتاقة فى وادى أبو الترافية عنـــد الجنوب الغربى أسفل جبل ثيبة وتتراوح منطقة إتصال الحجـــر الجيـــرى مـــع الصخور البازليتية حيث نلاحظ وجود الحجر الجيرى المتبلـــور الـــى الرخـــام الأبيض.

١٠- منطقة الباتوجا:Batoga Area

تقع المنطقة فى جنوب الصحراء الشرقية حيث تتكون من سلسلة رفيعة ذات تحول عالى ناتج عن إندفاع جرانيت الباتوجا الأحمر الوردى داخلها نـــتج

رخام الكالسيت الأبيض ذو النسيج السكرى أما الأجزاء السوداء فهى ناتجة عن المواد الكربونية وقد أثبت الشرقاوى من خلال الفحص الميكروسكوبى عام ١٩٧١م أن الرخام يتكون من الكالسيت دقيق التبلور وبلورات من الدايوبسيد والحزم الكلسية الغنية بالسيلكا كما يوجد بوفرة الولاستونيت فى التحول كما وجد الجارنت.

١١- مناطق أخرى:

بالإضافة الى المناطق السابقة الرئيسية توجد مناطق أخرى فرعية تستغل حاليا فى إنتاج الرخام وأغلبها يوجد أيضا فى الصحراء الشرقية المصرية وهي:

(أ) محجر رخام أسود:

يقع شرق جبل عطا الله عند تقاطع خط طول ٣٩ ٣٣° شرقا وخط عرض ١٥ ٢٦° شمالا كما يوجد أيضا محجر أخر للرخام الأسود جنوب غرب مرسى أبو دياب وهو عند تقاطع خط طول ٢٧ ٣٤° شرقا وخط عرض ١٨ ٢٥° شمالا تقريبا كما يوجد بوادى زيدون وأم لصاف محجر للرخام الأسود

(ب) محجر رخام الأبيض:

وهى محاجر رأس غارب، سمر العبد أبو حاد تجاه الكيلو ٤٨ طريق رأس غارب حيث توجد صخور الرخام الأبيض وهى عبارة عن أحجار جيرية تأثرت بالضغط والحرارة الناشئة عن وجود سد قاطع.

كما يوجد رخام أبيض جنوب جبل قاس بوادى السديب إلا أنه كثير التشققات كما يوجد الرخام فى وادى بنت أبو القرية عند خط عرض ٢٠ ١٥ ٢٠ وخط طول ٢١ ٢ ٣٤ فى البرامية فى الصحراء الشرقية حيث يوجد بكميات كبيرة

ثانيا: المحاجر الأجنبية Foreign Quarries

نظرا لعدم كفاية المصادر المحلية بما تتطلبه الإحتياجات فقد كان يـتم إستيراد الرخام من الخارج فقد وجدت فى حفائر أجريت بالإسكندرية كسر مـن رخام أجنبي مجلوب من اليونان.

كما كان الرخام يستورد منذ العصر المملوكي من الشام وأسيا الصغرى وأوربا وبخاصة ايطاليا لشهرتها بالرخام وقد إمتد إستيراده الرخام فى العصـر العثمانى الذى استعمل فيه كما تقول الوثائق الرخام الأبيض الأفرنجى فقد كـان العثمانيون يرسلون فى طلب الأعمدة الرخامية بالدست من كارارا ومما يذكر أنه يثبت إستيراد من مينانى ليفورينر ومرسيليا على هيئة كتل وأعمدة وبلاط وقـد تزايد حجم التجارة بين أوروبا ومصر بفضـل موقعهـا الجغرافـى وبفضـل الإمتيازات التى كانت تمنح للتجار الأوربيين فى شكل رسوم جمركية منخفضة وقد ثبت إستيراد الرخام لمصر فى القرن ١٢ بفحص التعريفة للرسـوم علـى الجمارك التى تحصل على السلع القادمة من الخارج الى ثغر رشيد للصـناديق من مربعات رخامية ولوحات مصممة للصق بالحوائط والأرضـيات وكـذلك لصناديق على هيئة أعمدة صغيرة أو نافورات تأكد إستيراد الرخام من اليونـان وكذلك من أسيا الصغرى كما إستعمل نوع من الرخام يسمى مرسين وهى مدينة مرسين الميناء التركى كما كانت الشام مصدرا هاما له بخاصة حلب والخليـل والذى ينتسب إليهما الرخام الحلبى والخليلى وكانت أهم الثغور المصـرية فـى العصر العثماني الإسكندرية ودمياط والسويس ورشيد.

والذى يهمنا من المحاجر الأجنبية للرخام هى تلك المحـاجر ذكرتهـا المصادر التاريخية من خلال كتابات المؤرخين القدامى خريطة رقم (٢) ومـن أشهر البلدان التى إستورد منها الرخام خلال العصـور اليونانيـة والرومانيـة والإسلامية اليونان وإيطاليا ومن أهم هذه المحاجر:

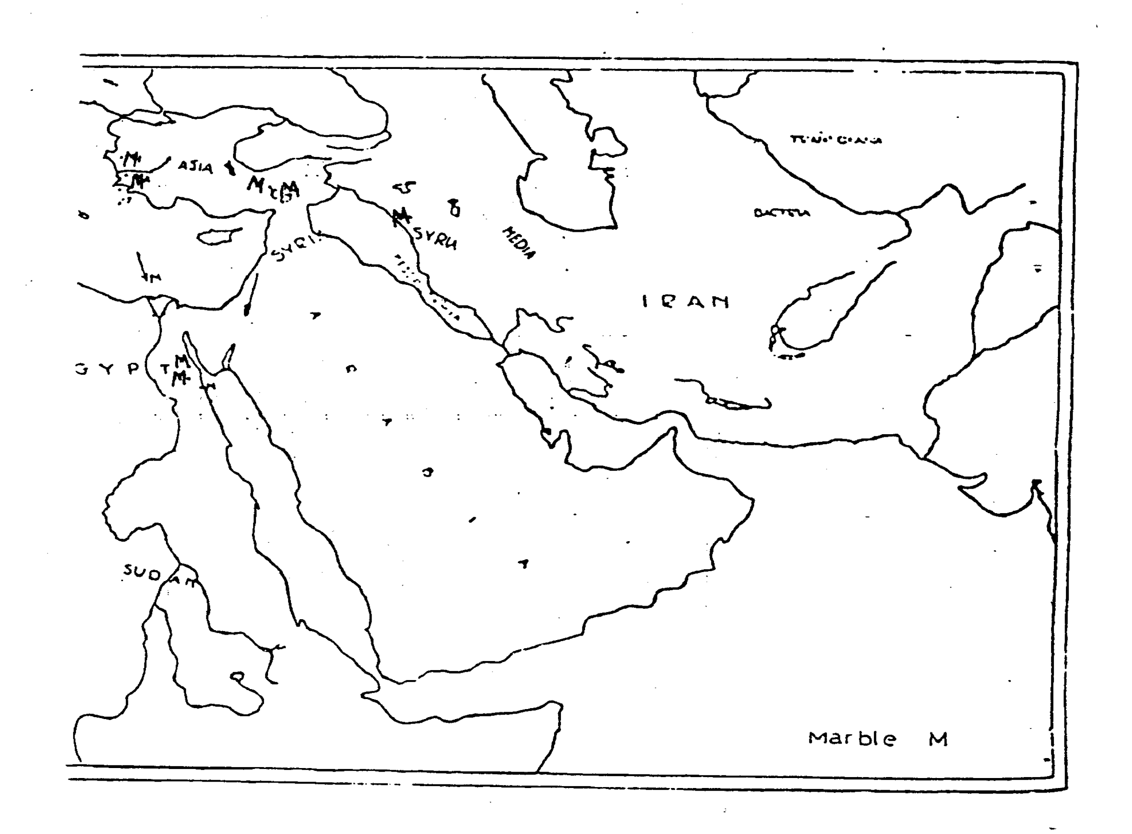
(١) المحاجر اليونانية: Greek Quarries

وقد أعطى فريزر Frazer سنة ١٩٦٣م وصفا عظيما لمحاجر البنتليكون Pentelican Quarries قد كان هناك نشاط عظيم فى هذه المحاجر وبخاصة خلال الفترة الهلينستية وفى اليونان أنتجت باروس Paros رخام التماثيل الأبيض كما أنتجت ناكسوس Naxos الرخام المائل للرمادي كما وصف بليني رخام Green Lacedaemanian أو الذى يعطى لمعانا أكثر من أى رخام آخر وقد ذكر إسترابو محاجر الرخام مثل Cappadocia كما أنتج الرخام من دوكيما Docimea

(٢) المحاجر الرومانية : Roman Quarries

وهناك معلومات عن المحاجر الرومانية وذلك من خلال كتابة Blacke M . حيث تحدثت عن عملية استخراج الأحجار حيث ذكرت أنه كانت تستخدم المعاول والمصورة على محاجر الكارارا Carrara Marble فى عملية الإستخراج وقد كانت تختار المحاجر على حسب قربها من النهر حيث يمكن نقله بطريقة أرخص بواسطة الماء الى روما.

وقد استغلت محاجر الكارارا Carrara Quarries قرب مدينة ليونا Luna على نطاق واسع كما توجد عروق للرخام الدلوميتى فى منطقة بروفينوس سوندورو Province Sondrio فى شمال إيطاليا بالإضافة الى المحاجر السابقة كانت توجد محاجر فى سوريا عند بعلبك وفى آسيا الصغرى.



خريطة رقم (ه): توضح أهم محاجر الرخام القديمة

طرق استخراج الأحجار
عند المصريين القدماء

طرق استخراج الأحجار عند المصريين القدماء

بلغ العلم بخصائص الأحجار وكيفية التعامل معها شأوا عظيماً خـــلال الدولة القديمة. فعرفت الخصائص الطبيعية والميكانيكية لكل نوعية من الأحجار، سواء منها أحجار الصخور الطباقية أو أحجار صخور أو أحجار صخور القاعدة (الصخور النارية والصخور المتحولة). وأمكن التعامل مع الصخور الطباقيـــة لكل نوع منها علي حدة، مما جعل صناعة اقتطاع الأحجار صناعة قائمة بذاتها لها قواعدها ووسائلها وأدواتها ولها رجالها المتخصصون.

كانت بعض الصخور تصنع منها أدوات منزلية صغيرة الحجم وأدوات صغيرة لطقوس المعابد، وكانت لهذه الصناعة تقنية مناسبة لها. أمـــا الأحجـــار الكبيرة التي تقتطع للبناء وللتكسيات الخارجية والداخلية للأبنية أو لعمل التماثيل أو لعمل موائد القرابين أو لعمل النعوش، فكانت لها هي تقنية مختلفة.

طرق استخراج الأحجار اللينة

لقد عرف المصريين القدماء كيفية استخراج الأحجار الجيرية والرمليـــة منذ عصر الدولة القديمة فكانوا عادة يقتطعون الأحجار اللازمة لبناء الأهرامات ومعابدهم من مواقع قريبة من أماكن أقامة الأهرامات أو المعابد.

واستخدم الأليستر في عمل التوابيت وموائد القرابين والتكسيات الداخلية للأبنية خلال عصر الدولة القديمة.

وكان مصدره الرئيسى محاجر (حاتنوب) أمام البرشة بالمنيا وأيضـــا محاجر الأليستر في وادى جراوى بالقرب من حلوان ويذكر ســـليم حســـن أن محاجر طره للحجر الجيري بقيت وقفا على الملوك والأمراء والخاصة الملكيـــة فى عهد الأسرات الفرعونية وربما كان أسم الحجر السلطاني الذي يطلق علـــى

أحجار طره قد جاءنا منذ عهد الفراعنة فلم يكن بمقـدور الأفـراد أن يقومـوا بقطعها ونقلها فكان الفرعون يتعطف على كبار موظفين فيمنح الفرد منهم تابوتا أو تمثالا أو يأمر بتصميم مقبرة له يتكفل بإقتطاع أحجارها ونقلها له إلى الجبانة ومن ضمن الأمثلة على ذلك أن الملك منكاورع أهدى الى احد المقربين منـه (دبجن) مقبرة ووجه تعليماته الى رئيس أعمال المناجم والمحاجر بالقصر ليقطع الأحجار اللازمة لبناء هذه المقبرة من محاجر طره.

وأيضا الأمثلة الهامة لعمليات تحجير أحجار الحجر الجيري هـو بنـاء اهرامات الجيزة حيث تم إقطاع أحجار الأهرامات فى التكاوين الصخرية القريبة من الأهرامات.

وقد تم أحضار أحجار التكسيه لبناء الأهرامات من الأحجـار الجيريـة التي تميزت بالبياض الناصع والصلابة من منطقة محاجر الضفة الشرقية للنيل عند طره والمعصرة.

وأيضا تم استخراج العديد من كتل الأحجار الرملية من محـاجر جبـل السلسلة بأسوان وتم نقلها لبناء المعابد الفرعونية فى العديد من المناطق المحيطة بها فى الصعيد وكانت الأحجار اللينة (الحجر الجيـري – الحجـر الرملـي – الألبستر) يتم أقطاعها بطرق معروفة كما يلي:

أ. طريق المحاجر المكشوفة Open quarries

وتتم هذه الطريقة بإزالة القشرة الهشه من الواجهة الصخرية المكشـوفة للصخر ثم يتم أقتطاع الأوجه العمودية بمساعدة أدوات معدنية وكـان اخـلاء الوجه الأسفل يتم بدق مجموعة من الأساقين الخشبية ويمثل تمثال أبى الهـول صورة نموذجية للمحجر المكشوف حيث تم اختيار نوع الحجر الجيري الـذي يصلح لعمل التمثال خاليا من الشروخ والفوالق التى يمكن أن تعيبه ثم أخليـت

الصخور الهشة من السطح والواجهة حتى انكشف الحجر السليم بعدها تم اخلاء الجوانب الثلاث (الجانبيان والخلف) حتى تبقى كتله حجرية متماسكة طولها حوالى الستين متر وارتفاعها حوالي ٢٥ مترا.

بعد ذلك تقدم الفنان النحات ليشكل تمثالا من هذه الكتلة الصخرية في مكانها على شكل أسد رابض له رأس رجل ويبلغ طول تمثال أبي الهول ٥٧ مترا وارتفاعه حوالي ٢٠ مترا ويمكننا أعتبار تمثال أبى الهول محجرا فريدا للمحاجر المكشوفة التي خطط لها تخطيطا سليما ونفذت أيضا بمقدرة عالية تنم عن تكنولوجيا محجرية وفنية عالية أبرزت لنا كتلة صخرية في صورة تمثال جميل تحدى الزمن وبقى حتى وقتنا الحاضر.

ب. طريقة المحاجر تحت الأرضية **underground quarries**:

وفيها يتم أعداد الواجهة الأملسية الكتلة المراد قطعها وتحديد طولها وعرضها ويتم أخلاء الجانبين الرأسيين بتفريغ أخدود عرضه لا يقل عن عشرة سنتيمترات ويمتد فى العمق الرأسي والعمق الافقى حسب الأبعاد المطلوبة

ثم يتم إخلاء الجانب الأعلى الكتلة بعمل حجرة ارتفاعها متر وهي المسافة التي تسمح بدخول عامل ليقوم بتفريغ الجانب الرأسي الخلفي الكتلة بأخدود عريضة لا يقل عن عشرة سنتيمترات وبعد اخلاء الجوانب الخمسة الكتلة (الجانبين الرأسيين والواجهة والجانب العلوي الافقى والجانب الرأسي الخلفي)

يتبقى الجانب السفلى التي يتم إخلاءه بدق مجموعة من الأسافين الخشبية المتتابعة التي تقوم بإخلاء الكتلة من جانبها السفلى وترفعها بالقدر الذي يسمح بربطها بالحبال لزحزحتها وأخراجها من المحجر.

وقد كانت طباقية هذه الأحجار تساعد على فصلها بالأسافين فى الاتجاه الأفقي كما وأن الشقوق الرأسية أيضا كانت تحدد أحجام الكتل السليمة وتساعد على فصلها رأسيا وكانت أخاديد التفريغ كما ذكرنا حوالي ١٠ سنتيمترات وكانت تتم بإستخدام شاكوش معدني (نحاسي) ذو حافة مدببة مركب على يد خشبية طويلة أو باستخدام أسافين أو أزاميل نحاسية طويلة وقد تم العثور على أسفين نحاس طوله حوالي خمسين سنتيمترا فى محاجر الجبلين بالصعيد.

وتوجد بعض المحاجر تحت الأرضية فيما بين طره والمعصرة وتحت بعض المغارات مئات الأمتار أفقيا تحت الجبل وتترك فى الداخل أعمدة من الحجر غالبا مربعة الأركان ولحجم مناسب وتتقارب من بعضها البعض بما يكفى لحمل السقف ومنعه من الانهيار كما هو الحال فى وقتنا الحاضر فى الاستخراج بطريقة الحجر والعامود Room & pillar وتمتد أيضا محاجر بن حسن مسافة حوالي خمسين كيلو متراً على امتداد حافة الهضبة الجيرية وتنتشر هذه المحاجر بأسوان في محاجر السلسلة الخاصة بالأحجار الرملية حيث نجد العديد من المغارات الخاصة بعمليات التحجير تنتشر بداخلها الأعمدة الحجرية التي تقوم بحمل السقف ومازالت بعض الكتل الحجرية المستخدمة من هذه المحاجر تزلد بالمحجر لخطأ ما حدث أثناء عملية تشكيلها شاهده عمل تكنولوجية المصري القديم ومهارته وفنه فى استخراج الكتل الصخرية اللينة منذ فجر التاريخ.

ثانياً: تكنولوجيا استخراج الأحجار الصلدة

المحاجر الأثرية فى مصر معروفة منذ زمن بعيد ولكن كثيرا من الزوار يركزون فقط على زيارة ومشاهدة محجر المسلة الناقصة بأسوان وذلك على الرغم من إمتداد التحجير فى مصر القديمة على مر العصور المختلفة من

بداية عهد الأسرات إلى نهاية العصور المتأخرة. فقد أستغل المصـــري القـــديم صخور الجرانيت بألوانها الجذابة بصلادتها وتجانسها وسماها منـــذ العصـــور القديمة فقد سمي الجرانيت الوردى بأسم "Mat" والجرانيت الأســـود بأســـم "Mat Kemt" وجرانيت جزيرة الفنتين بأسم "Mat en Abu" أســـتغلها فـــى أغراض البناء والزينة ومن هذه الوجهه ســـوف نستشـــهد بمـــا قالـــه العـــالم (Ball,1907) أن محاجر أسوان أستغلت منذ العصور القديمة بداية من الأسرة الرابعة (منذ أكثر من خمسة آلاف عام) الى العصر البطلمـــى علـــى فتـــرات متقطعة لعمل العناصر والتراكيب المعمارية وطوع خامة الجرانيت بأنامله تحفا وتماثيلا ومسلات شهد لها العالم بجمالها وعظمتها وشموخها.

فى الأسرة الثامنة عشر وصلت تكنولوجيا التحجير الى ذروتها عنـــدما أرسل سنموت المهندس فى عهد الملكة حتشبسوت لعمل مسلة للملكـــة بمعبـــد الكرنك والتى فاقت الثلاثون مترا فى سبعة أشهر من أهـــم المحـــاجر القديمـــة للجرانيت بأسوان محجر المسلة الناقصة، محجر الشلال، محجر جزيرة الفنتين وسهيل وعلى الرغم من أن محاجر الجرانيت بأسوان تعتبر المصدر الأساســـي لاستخراج معظم المسلات والتماثيل الضخمة إلا أن المنطقة لا تحتـــوى علـــى الكثير من النقوش الأثرية (أربعة نقوش) التى تتحدث عن أقتطاع هذه المسلات والتماثيل وذلك على الرغم من وجود أكثر من ٨٠٠ نقش أثرى فى هذه المنطقة أثنين من هذه النقوش توجد بطريق أسوان – فيله ونعود الى السنة التاسعة مـــن حكم الملك Sethos 1 والنقش الثالث فى جزيرة سهيل ويتحـــدث عـــن قطـــع مسلتين عظيمتين لـــرئيس كهنـــة Khnum . Satis and Anukis "أمنحتـــب" Amenhotepe والنقش الرابع موجود على الشاطىء الشرقي للنيل يقابل أطلال مدينة الفنتين وهو يصور المهندس سنموت أمام الملكة حتشبسوت ويتكلم عـــن قطع مسلتين عظيمتين لها هذه النقوش أحيانا تعطى لنا دلائـــل علـــى تاريخهـــا

ولكنها لا تعطى دلائل عن علوم عمليات التحجير التى تمت لاستخراج تلك المسلات فطرق التحجير والنقل والنحت لصخور الجرانيت قديما تعتبر سرا غامضا لم ينكتشف عنه النقاب حتى الآن رغم وجود الكثير من علامات التحجير على سطوح المحاجر بأسوان. وفى هذا الكتاب سوف نحاول إلقاء الضوء على بعض المشكلات والدلائل المبهمة لوضع تصور علمي لعلوم عمليات التحجير عند المصريين القدماء. فى العصور الفرعونية بدأ استغلال الكتل الجرانيتية المفصولة بفعل عوامل التعريه المختلفة وفى تطور لعمليات التحجير بدأ الحجار القديم فى استغلال الفواصل الطولية المتوازية التى يصل طولها أكثر من ٥٠ متر والتى يفصلها عن بعضها مسافات تصل الى ثماني أمتار أو أكثر والتى تقسم صخور الجرانيت فى أسوان الى كتل معينة الشكل Rhomboidal وأخرى بشكل متوازي مستطيلات blocks parallelized كتل عمودية الشكل ومحجر المسلة الناقصة - جنوب شرق أسوان يعتبر مصدرا هاما لتكنولوجيا عمليات التحجير فى العصر القديم ودراسة هذا الأثر الفريد قد تجعل الزائرين لهذا الأثر ينظرون إليه بنظرة مختلفة عن نظرتهم للآثار الكاملة ليس فقط من ناحية المجهود الكبير الذي تكبده المصرين القدماء لنقل هذه الكتل الجرانيتية وستين التعب والكد فى استخراجها من محاجرها ولكن الى انكسار قلوبهم عند فشلهم فى استخراج هذه الكتل الضخمة والتى قد تقود مهندسيهم أحيانا الى حافة الهاوية قبل إنجازهم عملا أثريا كاملا يقدمونه الى ملكهم الذي بدروه يهديه قربانا لألهتهم.

ليس هناك شك فى أن العمل الكامل يعطينا فكرة عامة وقليلة عن المهندسين الذين أنجزوه ولكن العمل غير الكامل بلا شك يعلمنا الكثير عنهم وعن تقنياتهم الفنية فى كيفية أنجازه.

ومن المشاهدة الحقليه للمسلة الناقصة نجد إنهـا عمـل عظـيم فشـل المهندسين القائمين على العمل بها فى استخراجها ليس لتقصير من جـانبهم أو من جانب عمالهم ولكن لشرخ غير متوقع فى الكتلة الصخرية الخاصة بها وهذه حقيقة جيولوجية معروفة حيث أنه كثير من الشروخ والكسور عبـر الطبقـات الصخرية والتى لها اتجاهاتها المختلفة بالطبع يمكن تجنبها ولكن البعض منهـا يكون صغيرا جدا لا يمكن ملاحظته بالعين المجردة ويظهر في المراحل النهائية من عمليات الاستخراج نتيجة لعمليات التقطيع والدق الشديدة على سـطح هـذه الكتل الصخرية مما يتيح لهذه الكسور الاتسـاع وبالتـالي ملاحظتهـا بـالعين المجردة وهذا بالفعل ما حدث بالمسلة الناقصة وقد حاول الحجار القديم استغلال الكتلة الحجرية السليمة لعمل مسلة صغيرة متجنبا الشروخ التى ظهرت بالكتلـة الأصلية ولكن حتى هذا العمل لم يكلل بالنجاح لظهور شروخ أخرى أدت الـى توقف هذا العمل.

لو كان قد تم استخراج المسلة الناقصة لبلغ طولها ٤١,٧٥ متـر فـى الارتفاع وحوالي ٤,٢٠ متر فى العرض والوزن النهائي لها ١١٦٨ طن أنجلباخ فى عام ١٩٢٢ لاحظ أثناء عمل الحفائر الأولية بالمسلة الناقصة كميات كبيـرة من الطوب اللبن المحروق والنصف محروق والكثير من كسرات الجرانيت ذات اللون الأحمر والبنى الغامق وذات النسيج المتفتت التى تعطى دلاله على أن هذه الكسرات الجرانيتية فى الماضى قد تم حرقها.

وفى ضوء هذا قرر أن أولى خطوات عمليات التحجيـر هـي تسـوية السطح لتجهيزه لعمليات القطع بوضع حزم من البوص وصفوف من الطـوب اللبن يتم رصها على السطوح الجرانيتية المراد تسويتها ويتم إشعال النار بهـا وبعد انتهاء عمليات الحرق لها يقوم بغمرها بالماء البارد الذي يتسبب في تفكيك

هذه السطوح وتكسرها وهنا نحاول أن نعرض المفهوم الجيولوجي الأثرى فـــى ضوء المعلومات الجديدة التى توفرت لدينا.

المحاجر الأثرية تتواجد على منحدرات التلال الجرانيتيـــة حيـــث يـــتم استغلالها بنظم محجرية واعية حيث تبدأ عملية إستخراج الكتل الحجرية من قمة التل (الصف الأول للكتل الحجرية) ثم يعقبها استخراج الصف الثاني من الكتل الحجرية وهكذا والغالب أن سطوح هذه التلال تغطى بسطوح مفككـــة متورقـــة نتيجة لعوامل التعرية المختلفة وهذه الظاهرة لا تسمح للحجارة القديم بإزالتهـــا بسهولة عن طريق عمليات الدق والطحن بالمطارق الحجرية المختلفة وتســوية هذه السطوح وبالمشاهدة والدراسة الحقلية للموقع تبين لنا أن المصريين القدماء استخدموا طرقا عالية فى الدقة فى عمليات تسوية الســـطوح غيـــر المنتظمـــة لتجهيزها لعمليات القطع.

أهم المحاجر بمنطقة أسوان

١. حيث تشاهد فى السطح المنحدر لتل الجرانيت أسفل المسله الناقصة يتواجد العديد من الفتحات الدائرية الشكل موزعة فى خطوط متوازنة على هذا السطح ويبدو أنها رصت يهذا الشكل لتسوية هذا السطح غير المنتظم لإعداده لاستخراج كتلة حجرية لكن لسبب ما لم يتم هذا العمل، مراكز هذه الفتحات والثقوب مقعره الشكل ومتورقة نتيجة لشدة الضغط الواقع عليها ربما نتيجة لاستخدام آلة حفر قوسية صغيرة أو بواسطة استخدام الأزاميل الحجرية وبإكتمال عمل هذه الفتحات يقوم الحجار القديم بإزالة البروزات بين هذه الفتحات ويقوم بتكرار هذه العملية حتى يتم تسوية السطح.

٢. وفى العديد من السطوح الجرانيتية بالمسلة الناقصة يتواجد العديد من الأشكال مربعة الشكل الشبه دائرية تظهر بصورة منتظمة بجوار بعضها على السطوح الجرانيتية التى حول المسلة الناقصة بل وتظهر أيضا على نفس المسلة وهذه العملية احتمال أنها تمت باستخدام الكرات الحجرية (الدوليريت، الجابرو) عن طريق الدق أو أن هذه الأشكال شبه الدائرية ما هي إلا أثار لحفر أو فتحات تم عملها باستخدام ألآت الحفر الحجرية.

وبالعودة الى عملية تسوية السطوح بواسطة عمليات إشعال النار burning process التى أفترضها العالم إنجلباخ والتى أيده فيها كثيراً من الأثريين اعتمادا على وجود كميات كبيرة من الفحم منتشرة بمحجر المسله الناقصة.

ومن خلال الدلائل الجديدة فنحن نقترح أن كميات الفحم المتواجده بهـذا المحجر ربما استخدمت في أفران صهر خام الحديد **iron smelting furnace** فى العصور المتأخرة حيث أنه فى ضوء الحفائر الأخيرة بالمسلة الناقصة (٢٠٠٢) وجدت كميات كبيرة من الكسرات والفتات الجرانيتى وخبث الحديد وكميات كبيرة أيضا من الفحم ومن الطوب اللبن المحروق والطوب غير تام الحرق وقد وجد أيضا عينه من ملاط الطين غير تامة الحرق ويظهر عليها أنامل أحد العمال بالإضافة الى عينة مهمة جدا وهى عينة تؤكد ارتباط هذه المكونات كلها لإنجاز عمل واحد حيث وجدت عينه منصهره لكتلة من الجرانيت مشبعة بخبث الحديد وهذه العينة مرتبطة مع طبقة من الملاط غير تامة الحرق وهذه العينة تحكى لنا القصة بواقعية تامة لما كانت عليه هذه الأدله السابقة فى الماضى والتى تفيد بحتمية وجود فرن لصهر الحديد بهذا المحجر والذي أدى بطبيعة الحال الى اختلاط خبث الحديد عند خروجه من فتحة تصريف الخبث بفتات وكسرات من الجرانيت التى تملأ المكان وأدت ارتفاع درجة حرارة الخبث الى إنصهار كسرات الجرانيت وبالمعاينة الميكروسكوبية أتضح انصهار حبيبات الكوارتز داخل كسرات الجرانيت المختلط بالخبث وهذا يعطى فكرة عن ارتفاع درجات الحرارة التى تكفى بطبيعة الحال الى صهر خام الحديد.

وبناء على هذه المعلومات فنحن نعتقد أنه فى نهاية العصور المتأخرة أستخدم جزء من محجر المسلة الناقصة كورشه صغيرة لصهر الحديد وعمل الأدوات الحديدية وشحذها مرة أخرى لإعادة العمل بها كما يحدث حتى الآن في بعض المحاجر الموجودة بمحاجر الجرانيت الحديثه بأسوان حيث نجد ورش صغيرة لإعادة شحذ وطرق وأحيانا تصنيع الأزاميل اللازمة لعمليات قطع وفصل صخور الجرانيت.

وأما عن وجود بعض السطوح الجرانيتية التى تظهر بها عمليات الحرق والتى نسبها بعض العلماء الأثريين إلى أنها دليل على استخدام عميلة الحـرق لتسوية السطوح فإن هذه الظاهرة فى بعض الأماكن تعزي الـى كـون هـذه السطوح هي سطوح لفواصل تتميز بلونها البني الغامق نتيجة لعمليات التعريـة الشديدة الحادثة على سطوح هذه الفواصل والتى تظهر لغير المتخصص كما لو كانت هذه السطوح قد تم حرقها فى الماضى وكذلك لا يفوتنا ذكر أن كثير مـن الكسرات الجرانيتية والفتات المحروق ربما كان فى الماضى جزءا من مواقـد لعمل الخبز وطهي الطعام وأنها كانت للعمال الذين يعملون بـالمحجر أو أنهـا كانت بجوار الفرن الخاصة بصهر الحديد والتى تحدثنا عنها سابقا. وبعد إزالة العمال لكل السطوح الغير مرغوب فيها وتسويتها ووصولهم الى قلب الصـخر الاصلى فإن الحجار القديم يقوم باستخدام طريقتين لإستخلاص الكتل الجرانيتية الضخمة من مراقدها.

١. طريقة القطع بإستخدام الحفر والطحن

drilling and pounded method

هذه الطريقة هي طريقة تعتمد على الحفر باستخدام ألة الحفر الحجريـة stone drill وموسعات الثقوب **Reamer** وتعتمد أيضا على عمليـات الـدق والطحن بإستخدام المطارق الحجريـة والكـرات الحجريـة المصـنوعة مـن Gabbro filint , dolerite , microgranit حتى وقتنا الحالي فـإن نوعيـة المادة المستخدمة فى عمليات القطعة سواء كانت معدن أو صخر مجال للجـدال بين العلماء لم تسعد بحلها حتى الآن.

ومازالنا نقف أمام علامات التحجير الموجودة بالمسلة الناقصة متعجبين لا نعرف ما هي الأدوات التى استخدمها المصري القديم وكيف قام باسـتخدامها أحدى المدارس تعتقد أن المصريين القدماء فى بداية عهد الأسرات قطعوا كتـل

الجرانيت من محاجرها باستخدام الأدوات المعدنية ونحن الآن نعرف أن المعدن الوحيد المستخدم فى قطع صخور الجرانيت هو الحديد Stell ولكن أداة من الأستيل لم يعرفها المصري القديم .

استخدم المصري القديم منذ عهد ما قبل الأسرات أدوات من النحاس والفلنت لقطع الصخور أما فى صورة أزاميل أو فئوس أو باستخدام المعاول أو القادوم واختلفت أشكالها فمنها المدبب والمسطح والمستدير ومنها ذو الرأس التى تشبه العقدة وهذه الرؤوس كانت مثبته فى أيدى خشبية.

فقد تم استخدام القادوم (adze) فى حجرة Kho-sekhmui من الأسرة الثانية برأس من الفلنت ووجد العديد من نحاتات الفلنت Flint scrapers المستخدمة فى مقبرة لانفير Tomb Ranefer فى حين استخدمت نحاتات من النحاس فى مقبرة نفرموت Tomb Nfermot وأيضا هناك أختبارات عديدة أجريت بأخذ عينات من الأدوات النحاسية وعمل قطاعات ميكروسكوبية لها وأظهرت هذه الاختبارات أن هذه الأدوات لم تعالج بدرجات حرارة عالية أو أساليب مختلفة أدت الى أختفاء تركيبها البلورى حيث وجد أن حافة هذه الأزاميل النحاسية يمكن أن تنثنى إذا استخدمت لقطع حجر جيرى صلد (Clark and Engelbach.1930) .

وهذه الدراسة تبين أنه قبل استخدام الأوتاد الحديدية فإن الأحجار الصلدة كانت تستخرج بإستخدام ألات الحفر الحجرية وموسعات الثقوب والمطارق والأزاميل الحجرية من صخور ذات صلابة عالية مثل الدوليريت والجايرو والميكرو جرانيت والفلنت ونحن نعتقد ان عمليات التحجير فى هذه المحاجر اعتمدت على تكنولوجيا حجرية متقدمة قادها المصريين القدماء منذ عهد بداية الأسرات. فمن الدلائل الأثرية نحن نعلم أنه حتى عهد الأسرة الثامنه عشر فإن الأدوات المختلفة كانت تصنع من الصخور المختلفة وخصوصا Flint الفلنت

والشيرت Chert كما أننا نعرف انها أستخدمت منذ عهد الأسرات الأولى فـــى نحت المقابر الحبلية الجيرية.

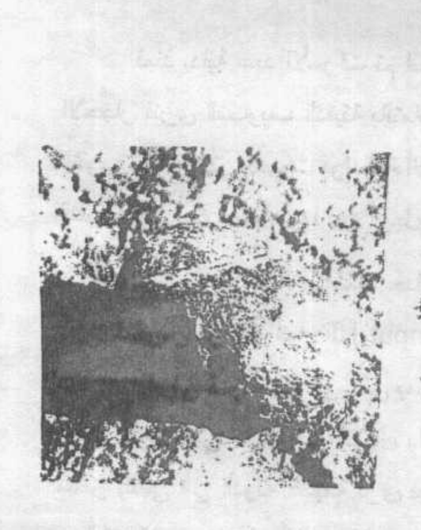
فكثير من المنحوتات والتراكيب غير المكتملة التى من الصخور الصلدة تظهر أنه تم تشكيلها بأدوات مدببة تشـــبه علاماتهـــا معـــول البنـــاء Stone pickmason أو بواسطة المطارق الحجرية ومن هذه الأدوات أداة متطاولة من الفلنت الرمادى لها خصر أو عنق فى وسطها وهى مدببة مـــن أحـــد جوانبهـــا موجودة بالمتحف المصرى بالقاهرة وهى تشبه معول الحجار القديم ومثبته على قطعتين من الخشب بواسطة أشرطه جلدية كما وجدت أداة أخـــرى مـــن هـــذه الأدوات بمحجر المسلة الناقصة لها حد قاطع مدبب تشبه قادوم تقطيع الأشجار من الفلنت.

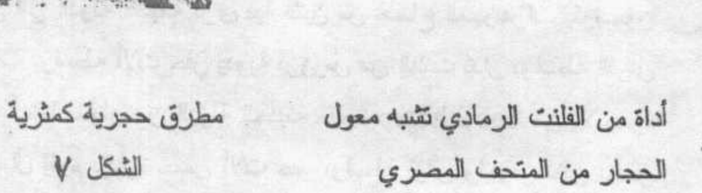
هذا بالإضافة الى العديد من المطارق والمدقات الحجرية مكثرية الشكل من صخور الجابرو والدوليريت بمحاجر المسلة الناقصة ومحجر جزيرة الفنتين.

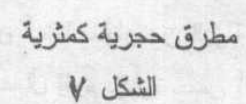
وهذه المدقات والمطارق الحجرية ممكثلة فى مقبـــرة تـــى Tomb Ti بسقارة من عهد الأسرة الخامسة حيث نرى أحد النحاتين يقوم بتشـــكيل تمثـــال بواسطة مطرقة كمثرية الشكل حجرية تشبه الى حد كبير المطرقة التى وجدناها بمحجر المسلة الناقصة جزيرة الفنتين كما نرى فى مقبرة أبا Tomb Aba فى دير الجيراوى Deir El Gabbrawi أحد العمال يشكل كتلة ضخمة من الصخر بإستخدام هذه الأداة ومن الجدير بالذكر أن أثار هذه المطارق كمثريـــة الشـــكل وجدت أيضا أثارها على كتلة صخرية بالجزء العلوى بالمسلة الناقصـــة حيـــث نرى تجاويف منبعجة أو بيضاوية الشكل على سطح كتلة جرانيتية كـــان مـــن المفروض استخراجها ولكن العمل توقف لسبب ما.

منذ عهد الأسرات بدأ أستغلال ألة الحفر الحجرية لتجويف الأواني الحجرية وهذه الألة تتكون من محور ذو طرفين من الخشب الصلد يمسك بشكل يشبه الهلال الحجر مربوط بواسطة أشرطة جلدية وتدار هذه الألة بإستخدام الأقواس الوترية. ألات الحفر مرسومة على جدران المقابر مثل مقبرة Mer Rcha Tomb ومقبرة تي Ti Tomb ومقبرة Tomb Ka um rho حيث تظهر بعض أنواعها كعمود خشبي معلق به على جوانبه ثقلين مربوطين عند قمته ينتهي بطرفين يمسكا بشكل يشبه الهلال من الحجر مثبت بهما كما تظهر بعض الات الحفر ذات الثقل الواحد في الدولة الحديثة وأما عن بدن هذه الألة فإنه أيضا يأخذ أشكال متعددة وقد يستخدم العامل هذه الألة وهو في الوضع الواقف أو هو متقرفص أعتمادا عن طبيعة العمل المكلف به.

ومن المحتمل أن المصرى القديم قد استخدم هذه الألات لقطع صخور الجرانيت بنفس المهارة التى استخدمها بها فى قطع الأجزاء الداخلية للأواني الحجرية الصلدة وبالطبع فإن الألات التى استخدمت فى المحاجر هى نفس الألات التى استخدمت فى الورش الصغيرة الخاصة بتصنيع الأوانى الحجرية لذلك لمعرفة أصل وتطور التحجير فى العصور القديمة يجب أن ندرس أصل وتطور ورش النحت الخاصة بالأحجار الصلدة عند المصريين القدماء فكما هو موجود فى عصرنا الحديث فإن الإزميل المستخدم لفصل وتشكيل الكتل الجرانيتية في المحاجر هو نفس الأزميل الذي يستعمله النحات أو المثال في ورشته الصغيرة ولكن بأحجام تتناسب مع القطعة النحتية التى يقوم بتشكيلها.



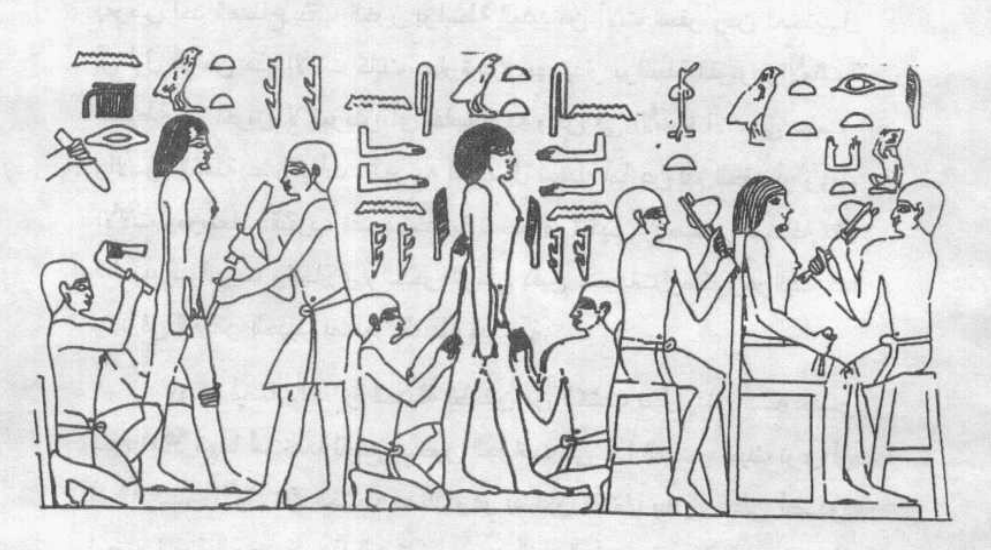




شكل ٦

أداة من الفلنت الرمادي تشبه معول مطرق حجرية كمثرية

الحجار من المتحف المصري الشكل ٧



صورة تمثل كيفية صناعة التماثيل الحجرية

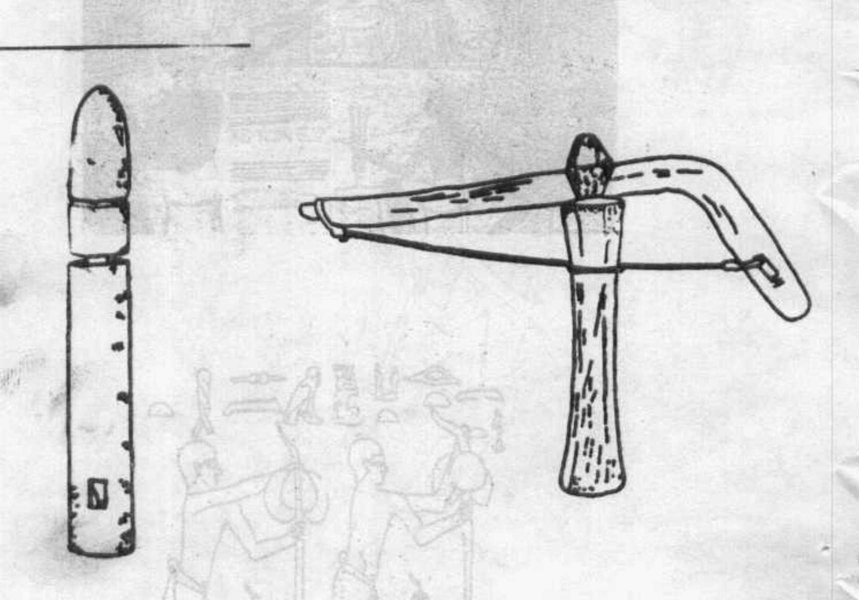
شكل ٨ مقبرة تي بسقارة

فمنذ بداية عهد الأسرات تم استخدام ألات الحفر فى ورش نحت الاحجار فنرى التجاويف الدقيقة بالتماثيل والأعين مازالت تحمل أثار العديد من الثقوب الدائرة التى صنعت بواسطة ألات الحفر الأنبوبية وخير مثال على ذلك الثقوب التى يمكن مشاهدتها بين أرجل تمثال الديوريت الشهير للملك خفرع.

وأيضا نرى مثالا واضحا جدا لإستخدام ألة الحفر على صدر تمثال Khema المكرس من أنبه sarenput I I فى عهد الملك sesontris و Amenemhat فى الدولة الوسطى بمتحف أثار النوبة والتى تظهر فى صورة ثقبين على جانبى صدر هذا التمثال بالإضافة الى العديد من المناظر ومنها منظر ينتمى الى الدولة القديمة نرى فية أثنين من صناع المجوهرات يقومون بعمليات الثقب بواسطة ألات حفر يدوية بروؤس من الفلنت تدار بواسطة القوس كما تعرض أيضا مناظر من الدولة الحديثة مقبرة Sobekhotep من الاسرة ١٨ أحد العمال يقوم بإدارة خمس ألات حفر بواسطة قوس واحد ومنظر لخر يعرض أحد الصناع يثقب الخرز بواسطة العديد من ألات الحفر ومن المحتمل أن أول ألة من هذه الألات كانت عبارة عن سهم يدار بواسطة القوس والأمثلة البسيطة من القوس لا تعرض أى تفاصيل به ولكن فى الأسرة الاثنى عشر والأسرة الثامنة عشر بدأت تظهر به التفاصيل نسبيا أما عن لقم الحفر أو رؤس الألات وموسعات الثقوب فقد استخدمها المصرى القديم من صخور مختلفة مثل الفلنت، الدوليريت والجايرو والحجر الرملى دقيق الحبيبات وميكروجرانيت كما وجد فى الحفائر الحديثة بمحجر المسلة الناقصة.

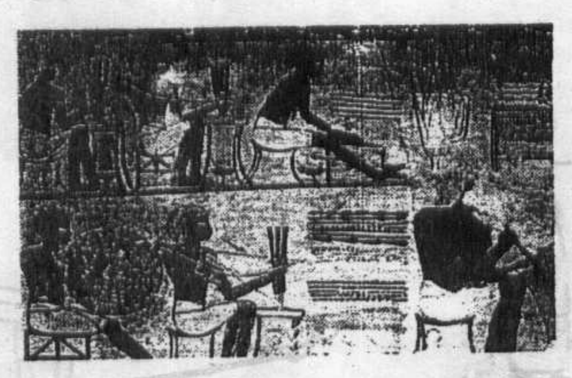
ووجد أيضا بالحفائر الحديثة قطعتين من الخشب تمثل يدنى ألـه حفر نحن نعتقد أنهما أستخدما لقطع صخور الجرانيت فى هذا المحجر حيث نرى أن يد ألة الحفر الأول من الخشب الصلد وهو يد غير مكتمل يحتوى على أخدود لوضع اللقمة الحجرية وهذا اليد تشبه يد ألـه الحفر المذكورة بواسطة

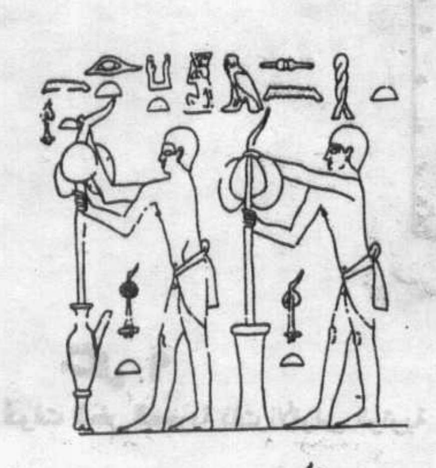
(Petrie.1937) الذى يعود الى الأسرة الثانية عشر والمكتشفة فـى Kahun وأيضا الذى يعود الى الأسرة الثانية عشر من Gurob أما اليد الأخرى فهو غير مكتمل يتكون من ساق خشبية تنتهى بطرفين من الخشب الصلد وهـذه الساق تحتوى على أخدود دائرى حولها يلفها ويبدو أنه كان لمرور وتر القوس المنوط به دوران هذه الألة مما يؤكد هذا وجود جزء من خيط الوتر مازال موجودا فى ثنايا الأخدود بهذه الساق الخشبية وهذه الأله تشبه يد الة حفر من عصر الأسرة الثانية عشر من (Petrie.1937).



شكل ٩

بعض أدوات الحفر الحجرية ذات الأقواس الوترية





شكل ١٠

أداة الحفر الحجرية بمقبرة سويك حوتب – دولة حديثة

ونجد ان هذه الصورة لإستخدام ألة الحفر بالمسلة الناقصة تكتمل عندما ترى العديد من الأثقال الحجرية (Caps) أو الغطاءات الحجرية المخصصة لهذه الألات ممثلة بين حفائر محجر المسلة الناقصة حيث ترى العديد منها بمختلف الأحجام تبعا لإختلاف ألات الحفر المستخدمة لها حيث وجد منها غطاءات حجرية كبيرة الحجم تتراوح أقطارها من ٣٢سم الى ٤٥سم وهذا يعنى أستخدامها لألات حفر عملاقة ومنها الأنواع الصغيرة التى يتراوح قطرها حوالى ٥سم وهذه الغطاءات الحجرية تشبه العلامة الهيروغريفية (t) على شكل نصف كرة ويبدو أن هذه العلامة قد أشتقت من هذه الغطاءات.

ومن بين الحفائر بالمسلة الناقصة وجدت كميات هائلة من الكرات الحجرية من صخور مختلفة (دوليريت – ميكروجرانيت- جابرو) يتبع قطرها من ٣٦سم الى ٤٧ سم الى كرات صغيرة الحجم يصل قطرها الى ٤,٥سم.

والمناظر والمعلومات الاثرية "يشير الى أستخدام المصريين القدماء لهذه الكرات والأزاميل الحجرية كما هو ممثل فى مقبرة neb amun tomb من الأسرة ١٨ بطيبة ومقبرة الوزير Rekhmira tomb بسقارة وبفحص العديد من الكرات الحجرية تبين أن الإحتكاك أو البرى بها غير موزع على سطح كل كرة كما هو متوقع أذا كان استخدامها قد تم بالفعل بواسطة اليد مباشرة ولكن البري والأحتكاك يظهر في صورة جزئية وهذا يعني أستخدام هذه الكرات أو المدقات فى وضع واحد حيث تم أستهلاكها فى اجزاء ثابته نتيجة لعمليات الدق والطحن.

وتخبرنا المعلومات الأثرية أن هذه الكرات كانت تتصل بأيدى خشبية وذلك لوجود قطعة من الدوليريت من عهد الأسرة الحادية عشر أكتشفت مربوطه بشرائط جلدية على قطعتين من الخشب بحفائر الدير البحرى وقد

أقترح أنجلباخ فى ١٩٢٢ أن هذه المدقات قد استخدمت فى صورة المندله كما تستخدم فى عصرنا الحديث وبهذه الطريقة فإن رجلين يمسكا بها من أعلى بينما الرجل الثالث يمسك بها ويوجه ضرباتها من أسفل للجزء المراد دق أو طحنه وعن كيفية تثبيتها يقول أنه ربما أستخدمت أشرطة جلدية من خلال فتحة صغيرة بها تمنعها من الأنزلاق.

ويبدو مؤكدا أن هذه الكرات بالفعل لم تستخدم مباشرة باليد لكنها ربما تم تثبيت هذه الكرات فى الأت تشبه ألالت الحفر وتدور بنفس الفكرة بواسطة أقواس وترية كبيرة وربما نتيجة لعملية الدوران والإحتكاك السريع العال بسطح صخور الجرانيت هى التى أدت إلى إنشطارها وكسرها الى أجزاء ونحن نقترح أنه ربما أستخدمت هذه الكرات أجزاء من ألة طحن عظيمة تدار بواسطة الأقواس الوترية لتوسيع الحفر الدائرية التى تم حفرها مسبقا بواسطة ألات الحفر الحجرية.

وبعد فحص العديد من الكرات ومقارنتها ببعضها لاحظنا أخاديد على جوانب العديد من الكرات التى ربما كانت لعمليات تثبيت هذه الكرات بين طرفين المحور الخشبي ذو الطرفين المستخدم فى ألة الحفر الحجرية. وليس غريبا أن تستخدم هذه الكرات فى عمليات توسيع الحفر وإلا لماذا تم العثور فى الموقع على كرات حجرية صغيرة الحجم لا يتعدى قطرها ٥سم وبالتالى فإن الحجار القديم أحتمال أنه أستخدمها فى توسيع الحفر الأولى الذى صنعها بألة الحفر الحجرية ثم يقوم بتوسيع الحفرة الى الإتساع المطلوب وهذا يفسر وجود الكرات بأحجام وأقطار مختلفة ووجود الكرات بسطوح شبه ناعمة ووجود الكميات الكبيرة من مسحوق الجرانيت الذى يملأ أماكن الأستخراج الفرعونية بالمحجر وهنا نحاول تفسير أختيار المصرى القديم لبعض الأنواع من الصخور التى أستغلت منذ عصور بداية الأسرات بواسطة الحجار القديم لطحن وقطع

الجرانيت وذلك بدراسة الخواص الطبيعية والميكانيكية لها وقد أختيرت للدراسة صخور

1. Dolerite 2. Quartz diorite 3. Fine grained granite
4. Coors grained (monumental grante)

وبعمل الإختبارات التالية على هذه الصخور:

1. Compression test 2. Hardess
3. Absorption 4. Specific gravity

وجد أن صخور الدوليريت تعرض أكبر قوة كبس لها حيث تصل الى 1750 kg/cm2 وأعلى قوة ضرب (12-17 asstandard of stokes) بينما نجد أن صخور الجرانيت الأثرية تعرض حوالى 636 kg/cm2 وتعرض أقل قوة ضرب لها (12-10) إذا ما قورنت بصخور الدوليريت وبالتالى بناء على هذا فنحن نقترح أن المصريين القدماء أستخدمو الألات الحجرية والأدوات الحجرية فى عمليات تقطيع وتشكيل صخور الجرانيت. ويبدأ الحجار القديم عمله قبل أستخراج المسلات الكبيرة بعمل حفر الإختبار Test holes حيث يتم حفرها لتحديد طبيعة الصخر والتأكد من عدم وجود شروخ أو عيوب بهذه المسلة المراد استخراجها وهذه الفتحات تظهر بشكل مربع أو شكل مستطيل بجوانب مستديرة ويصل قطر هذه الفتحات ١٠٩ سم فى الطول بينما عرضه حوالى ٧٧ سم وتوزيع هذه الفتحات توزيعا دقيقا متباعدا بطول المسلة المراد أقتطاعها ويعتقد أنجلباخ فى عام ١٩٢٢ أن هذه الفتحات وتم عملها فى بداية العمل لدراسة جودة الكتلة الجرانيتية قبل أقتطاعها ويتم اختبار الشروخ التى يمكن أن تظهر بإستخدام الدق بالمطرقة الحجرية حتى اختفاء الشروخ أو اتساعه وبعد ذلك بتم تخطيط الشكل المراد إستخراجه بإستخدام خيط مشدود وعلى بكره

يتم غمره فى المغره الحمراء ويتم التحديد به وبعد ذلك تبدأ عمليات الإستخراج وهذه تتم عادة بعمل خنادق الفصل الرأسية لتصبح الكتلة حرة من جوانبها ثـم عملية فصل الكتلة من أسفل.

من كل ما سبق سرده يتضح أن هناك تكنولوجيا عالية الدقة أسـتخدمت فى عمليات التحجير مازالت غائبة عنا فما هى الالة التى أستخدمت لإسـتخراج الكتلة الصخرية والتى تترك ورائها سلاسل من القطـوع الرأسـية المتوازنـة المتساوية الأبعاد والتى تظهر كما لو كانت صنعت بمغرفة كبيرة كمـا نـرى علاماتها ماثلة بمحجر المسلة الناقصة وفى هذه النقطة يجب الإشارة الى ما قاله إنجلياخ ١٩٩٢ " نحن مندهشين لغياب أى علامات لأزاميل أو أوتاد فنحن على علم بأثار الأزاميل القديمة ولكن هنا فى محجر المسلة الناقصة نجد سلاسل من القطوع الرأسية المتوازية والتي تظهر كما لو كان الصخر المستخرج قد قطـع بمغرفة جبن عظيمة ولهذا نقترح أن خنادق الفصل فى محجر المسلة الناقصة قد تمت بواسطة عمل عدد كبير من الحفر أو الفتحات المتراصه بجـوار بعضـها وعلى أبعاد متساوية بواسطة الات حفر تتناسب مع هذا الغرض وهذا الإقتراح يتوافق مع العديد من المؤلفين الأثريين مثل يتـرى ١٩٣٧ الـذى وجـد فـى Dier el bersheh مسطح صخرى عليه العديد من الحفر الأنبوبة الكبيرة يصل قطرها ٤٥سم والتى بلاشك تمت بإستخدام ألات حفر وكذلك وجد العديد من أثار عمليات الحفر على سطوح كتل الحجر الجيرى فى حـوائط وأسـوار الملـك Djoser والتى تمت بواسطة عدد كبيرة من الفتحات القريبة من بعضها ويخبرنا أرنولد ١٩٩١ بأن أول استخدام لألة الحفر على نطاق كبير ربما أسـتخدم فـى تشكيل التوابيت في الأسرة الثالثة أو الرابعة

وبالطبع لصنع العديد من الفتحات لعمل خنادق الفصل يجب مبدأيا إزالة من ٢-٣سم من الصخر بواسطة المطرقة الحجرية فى صورة حفـر دائريـة

لوضع ألة الحفر الحجرية التى يتم لفها بواسطة قوس وترى كبير أو عدد من الأقواس يتم أدارتها بواسطة عدد من العمال حيث يتم عمل العديد من الفتحات المتوازية التى يفصلها عن بعضها أبعاد متساوية وبعد ذلك يتم إزالة البروزات أو الحواف الصخرية بين هذه الفتحات بإستخدام المدقات والمطارق الحجرية. وبالطبع يبدا العمل من قمة سطح خندق الفصل بإستخدام ألات الحفر وموسعات الثقوب مختلفة الحجم حتى عمل الفتحات المطلوب ولتسهيل عمليات الطرق وعمليات الحفر يتم تغذية ألة الحفر بالرمال والماء أثناء الدوران لزيادة عملية الإحتكاك وضمان زيادة سرعة الدوران لألة الحفر وألات موسعات الحفر وقد وجد بمحجر المسلة الناقصة عدد من لقم الحفر وهى من صخور silt stone وصخور microgranite وهى تشبه شكل عش الغراب – Mushroom shaped بقطر دائرة حوالى ١٦سم ويحمل بدنها العديد من البروز الدائرية ولكن الساق المكملة للبريمة مكسورة ونجد أيضا أن رأس هذه البريمة تحتوى على أخدودين على جانبيها لزيادة عملية الحفر حيث يعمل كل أخدود كما ولو كان مغرفة حفر صغيرة drill scoop وذلك عند دورانها بواسطة القوس وعلي الجانب الأخر نجد أن الحجار القديم أستخدام رؤس للحفر ولتوسيع الحفر تشبه نصف الهلال وهذه الألات موسعات ثقوب reamer وقد وجد العديد من هذه الرؤوس بمحجر المسلة الناقصة بأشكال مختلفة.

فمنها نوع ذو رؤوس ذات أشكال نصف هلالية فى الشكل تختلف حجم قطرها من ٢١سم الى ٦٢ سم وكذلك فى السمك من ٢,٥ الى ٣٥ سم وهى من صخور الدوليريت ونجد ان أثار الاحتكاك والبرى تظهر فى أجزاء منها وليست موزعة على كل الأداة مما يعنى أستخدامها فى وضع ثابت.

والنوع الثانى بشكل مخروطى مقطوع مختلفة الحجم من الدوليريت أو الكوارتز ونجد أن أثار البرى والإحتكاك تظهر على جوانب هذه الأداة بإستثناء

القاعدة ومن الواضح أن هذه الأدوات أستخدمت كموسع للفتحات أو الحفر كانت مثبته بمحور أو يد من النحاس أو الخشب يدار بواسطة القوس ويمكننا القـول أنها تعمل بنفس فكرة الة الحفر الحجرية. والنوع الثالث بشكل أسطوانى يوجـد على أحد جوانبه بروز مربع الشكل طول هذه الأسـطوانة الحجريـة حـوالى ٤٥ سم ولها قطر ٦٠ سم وهى تحتوى على ثقب من أحد جوانبها ويبدو أن هذه الفتحة كانت تثبت منها وهى من صخور الجرانيت أو من صـخور الحجـر الرملى دقيق الحبيبات. ويبدو أن هذه الأداة كانت تستخدم فى صـورة مطحنـة أسطوانية الشكل لتسوية وتوسيع فتحات الحفر الكبيرة ثـم فتحـات الإختبـار وإحتمال أن هذه الأدوات كانت تتصل بمحور دوران من الخشب يدار بواسـطة قوس وترى واحد عظيم أو عدد من الأقواس يديره عدد من العمال بنفس فكـرة الة الحفر الحجرية وعامة فإن عملية الحفر يجب أن تحـدث فـى عـدد مـن الخطوات المحدودية طول ألة الحفر ورؤسها الحجرية وكذلك أحتياج العمال الى إزالة وتكثير البروزات والحواف التى بين فتحات الحفر ثم متابعة عمل فتحات جديدة على نفس أماكن الفتحات السابقة ويستمر العمل بهذه الطريقـة الـى أن تصل الى العمق المطلوب لخندق الفصل المطلوب.

وهذا يفسر وجود العديد من الأخاديد الرئيسية المتوازنة فـى جوانـب خنادق الحفر وهماك العديد من الأدلة التى تشير الى استخدام طريقـة الحفـر بالمسلة الناقصة كطريقة من طرق التحجير فى هذا المحجر. يوجد أعلى المسلة الناقصة بقايا أربع فتحات مستطيلة الشكل قطرها حوالى ٩٠ سم فى الطـول و ٥٥سم فى العرض.

كل فتحة مستطيلة الشكل تظهر كما لو كانت مكونة من قمتين بجـوار بعضها حيث نجد أن قطر الفتحة الأولي يساوى نفس قطر الفتحـة الثانيـة وإن المسافات البينية بين هذه الفتحات المستطيلة متساوية نسبيا.

وبالتالى هذه الفتحات لايمكن أن تمثل فتحات أختبار لوجودها بجـوار بعضها على خط واحد وفى منطقة متصلة مساحتها صغيرة بعكس المعـروف عن فتحات الإختيار حيث تكون متباعدة وعلى مسافات كبيرة للتعـرف علـى المنطقة.

ونحن نعتقد أن هذه الحفر ماهي الا بقايا العديد من الحفر التى صـنعت من أجل الحصول على خنادق فصل وأيضا تتواجد العديد من الحفر المنتشـرة بمحجر المسلة الناقصة تصطف في صف وخط واحد على مسـافات متسـاوية وكذلك أثار العديد من هذه الحفر والبروزات فى خط واحـد وعلـى مسـافات متساوية ويوجد أيضا احد الحفر مربعة الشكل ومحاطة بالعديد من الإنخفاضات دائرية الشكل والتى من المرجح أن تكون بقايا للعديد من الحفر والبروزات.

أيضا تتواجد فى الجزء السفلى للمسلة الناقصة العديد من الحفر التى فى خط واحد ويفصل بينها مسافات متوازية ويبدو وأننا الأن متأكدين أن هذه الحفر أستخدمت بغرض الحفر وعن طريقها يتم تجهيز خنادق الفصل لفصـل كتلـه صخرية قد تكون مسلة أو تمثالا عظيم الحجم ومن جهة أخرى فـإن الحجـار القديم أستخدم طريقة معدلة من الطريقة السابقة لعمل خنـادق الفصـل. هـذه الطريقة تبدأ بأن قاطع الأحجار يقوم بعمل فتحة حفر واحدة ثم يقوم بتوسيع هذه الفتحة بواسطة أستخدام موسع الثقوب أو ألة الطحن الأسطوانية الحجرية بعـد ذلك يقوم الحجار بتحريك مكان او محور أله القطع الإسطوانية لتوسيع الفتحـة السابقة فى اتجاه واحد وهذه الأدوات أو الألات بشكل أسطوانى مخروطى ولها قطب أو بروز واحد وتعمل للطحن والقطع وهى من صخور الجرانيت أو مـن صخور الحجر الرملى وتدار بواسطة قوس واحد أو العديد من الأقواس

هذه العملية تتكرر حتى يكتمل خندق الفصل وهذه الطريقة ممثلـة فـى الجزء الشمالى من محجر المسلة الناقصة. حيث نجد هناك عملية مبدأية لعمـل

خندق فصل حيث نرى فتحة أختيار طولها ٧٦سم تم توسيعها الى خندق فصـــل غير كامل طوله ١٣٨سم وعرض الخندق ٧٧سم هو نفس عرض فتحة الإختبار ويظهر بالفعل الأخاديد المتوازنة المتساوية فى الأبعاد على مســـافات متســاوية نفس هذه الظاهرة تتكرر مرة أخرى.

وفى النهاية يمكن القول أن خنادق الفصل تم عملها بواسطة عمل العديد من الفتحات التى تكون علي خط واحد على مسافات متساوية من بعضها. نهاية بالقرب من محجر المسلة الناقصة طبقات من الكسرات الصـــخرية المقطوعـــة ومسحوق الجرانيت والفحم ولا يوجد أى أثار لأى لون أخضر وكميات كبيـــرة لكسرات من الدوليريت والجرانيت وبناء عليه نحن نقترح أن هذه المواد السابقة هي فى الغالب الأدوات المستخدمة لقطع وتشكيل خنادق الفصل، هذه الصـــورة تكتمل بواسطة وجود كميات من كرات الدوليريت والبكروجرانيت والعديد مـــن لقم أدوات الحفر وموسوعات الثقوب هلالية الشكل الحجرية وأبدان الات الحفر التى وجدت. وخنادق الفصل فى محجر المسلة الناقصة حوالى ٧٥ســـم وهـــو مقسم الى قطاعات عمل كل قطاع حوالى ٦٠سم فى الطول وهذه هى أصـــغر مسافة لإتاحة الفرصة للعامل للتقرفص والسجود أثناء عمل الفتحات.

وقطاعات العمل هذه تعلم بواسطة خطوط حمراء رأسية وعلامات مـــن المغرة الحمراء عن طريق الحجار والكثير من هذه العلامات غير معروف حتى الأن ولكن الخطوط الرأسية الحمراء تدل على الأخاديد المتوازية ذات الأبعـــاد المتساوية وقد قرر إنجلباخ ١٩٩٢ أن ملاحظ العمل كان يقوم بقياس التقدم فـــي العمل في الفتحات بواسطة مقياس يمثل الذراع ويقوم بوضع العلامـــات علـــى الحائط بالمغرة الحمراء عند قياس كل ذراع وعند إعداد خنـــدق الفصـــل فإنـــه يجب أن يكون أعمق من المطلوب للكتلة المراد أستخدامها. حيث يتم من أســـفل عمليات تفريغ الجانب السفلى للكتلة الصخرية وذلك بواســـطة أســـتخدام ألات

الحفر الحجرية وتوسيعها بإستخدام موسعات الثقوب والمطارق الحجرية ويـــتم عمل ألات الحفر من كلا الجانبين يتم عمل أخاديد أو قنوات أو أنفـــاق أســـفل المسلة أو الكتلة المراد أستخراجها على مسافات متساوية وحتى الأن مازالـــت أثار هذه الأخاديد او الإتفاق ترى أعلى المسلة الناقصة بأسوان.

حيث نرى تكنيك هذا القطع السفلى يوجد بالجانـــب الشـــمالى بمحجـــر المسلة الناقصة حيث هناك تجد أنفاق افقية عند مسافات متساوية وهذه الأنفـــاق مقسمة الى خمس أجزاء بشكل نصف دائرى وربما تمثل العديد مـــن مراحـــل الحفر من جانبى الكتلة الصخرية حيث نجد أن كل جزء ينفصل عـــن الجـــزء الأخر بواسطة بروز إحتمال أنه يمثل فترة توقف لعمل ألة الحفـــر المحدوديـــة طولها لإزالة الركام ونواتج طحن صخور الجرانيت ثم مواصلة الحفـــر مـــرة أخرى وهكذا إلي أنتهاء العمل ونحن نعتقد أن عملية القطع من أسفل تتم بنـــاء علي العلامات المخططة على جانبى جدران خندق الفصل والتى عن طريقهـــا يمكن تحديد زواية وأتجاه القطع من أسفل من كلا الجانبين وبعد اكتمال عمـــل الأنفاق او الأخاديد أسفل المسلة يتم استخدام العديد من جذوع الأشجار المناسبة أستخدامها لحشو هذه الأنفاق ثم يتم إزالة الفواصل الحجرية بين هـــذه الأنفـــاق بإستخدام الأزاميل والمطارق الحجرية لإستكمال اســـتخراج المســـلة أو الكتلـــة الحجرية المرادة وعملية الفصل السفلية تظهر على العديد من الكتل المفصـــولة ولكنها لسبب ما لم تستخدم وبقيت لنا شاهدا على هذه العملية حيث يظهر بالجزء المفصول الأخاديد أو الأنفاق التى استخدمت لفصله والتى تظهر على الصـــخر كما لو كانت علامات تماوج Ripple marks وبالطبع فإن هذه العملية تحتـــاج الى عدد من الرجال لعمليات الحفر وعمليات الطرق دون تداخل أحد الرجال فى عمل الأخر وأثناء العمل نجد أحد الرجال يقوم بالغناء فى لحـــن يتناســـب مـــع

عمليات الحفر والطرق وذلك لتشيع العمال وتسليتهم أثناء فترات العمل الطويلة من عمل شاق يحتاج الى مجهود عضلى ومجهودٍ عقلى أكبر

الطريقة الثانية لتحجير الجرانيت عند المصريين القدماء

(طريقة القطع بأستخدام الأسافين):-

تدعى طريقة الأسافين **Wedging of The Rocks** وهــذه الطريقــة أستخدمت قبل العصر الرومانى .

وقد استخدمت هذه الطريقة بواسطة عمل أساقين يدويه فى العديد مــن أنواع الصخور المختلفة كطريقة جيدة من طرق الإستخراج والتى مازالت بعض محاجرنا العادية تستخدم هذه العملية.

العديد من الكتاب درسو فتحات الأسافين فى محاجر أســوان وأعطــوا أقتراحات عديدة عن هذه العملية مثل فلنــدز بتــرى **Flinders petrie 1938** والذي قرر أن فتحات الاسافين الأساسية قطعها المصريين القدماء عند مسافات متساوية تدل أن أسافين خشبية أستخدمت عن طريق الترطيب بالمــاء لفصــل الكتل الصخرية

وأيضا من المحتمل أن الحجار القديم قام بإستخدام طريقة مــن أحــدى الطريقتين المستخدمتين لفصل الجرانيت فى الهند الأولــي بواســطة الأســافين الخشبية بالماء والأخرى عن طريق التسخين لأخدود على سطح كتلة الجرانيت بواسطة النار ثم غمرها فجاة بالماء البارد وأيضا السير **J.F.Hershei** فضــل الموافقة على نظريــة الفصــل بواســطة التســخين بواسطة النــار بينمــا **Wil Kinson Surmises** فضل طريقة الأسافين المبللة بالماء حيث قال أنــه من المحتمل أن القناة التى تحتوى على فتحات الأسافين أحتمــال أنهــا أعــدت للمحافظة على الماء اثناء عملية الترطيب وبناء عليه يحــدث تمــدد لأســافين

الخشب والذى يؤدى الى عملية فصل الكتل الصخرية ومن جهة اخرى أنجلباخ يسأل كيف لهذه الأسافين من الخشب تتمدد وتفصل كتل الجرانيــت بواســطة التبليل بالماء هو غير متأكد من هذا ويعتقد أن هذه الطريقة غير حقيقية والسبب أن هذه الفتحات الخاصة بالأسافين دائما تجدها مخروطية الشكل كلمــا أتجهنــا للداخل وهو يعتقد أن الأسافين المبللة فى هذه الحالة تميل الى أن تقفز للخــارج أكثر من أن تحدث ضغطا جانبيا على الصخر لفصله هو رأي أسافين خشــبية بمحجر للحجر الجيرى، هذه الأسافين لها فتحات متوازية الجوانب لــذلك فهــو يفترض أن أسافين معدنية قابلة للطرق قد تم أستخدامها والأسافين الخشبية لــم تستخدم. أفضل مكان لدراسة عملية الفصل عن طريق الأسافين نظهر بمحاجر أسوان للجرانيت.

أول خطوة تتم لفصل البلوكات الجرانيتية الصخور الأم تكــون رســم أسكتس للبلوك المراد أستخراجه بواسطة المعزة وعمل قناة أو أخــدود بطــول حدود البلوك الصخرى من كل جوانبه (الأربعة جوانب) بواسطة الأزاميل بعمق حوالى ٢سم وبعد ذلك فإن العامل المصرى يجهز فتحات للأسافين المعدنية على خط واحد والذى يتم عملها بداخل هذه القناة أو الأخدود. محاجر أسوان تعرض العديد من القنوات التى صنعها الحجار القديم كمثال لمحجر النوبة فــى أســوان نجد قناتين أطوالها تمتد من ٨٦ الى ١٥٠ سم وعرضها حوالى ١٠سم وعمقها من ١,٥ الى ٢ سم. القناة الأولى لا تحتوى على فتحات الاسافين بينمــا القنــاة الثانية تحتوى على فتحات الأسافين وأيضا تظهر أثار القنوات أو الأخاديد بدون فتحات الأسافين وكذلك بفتحات الأسافين التى استخدمت لفصل الكتل الصخرية الجرانيتية فى الجزء الجنوبى لمحجر المسلة الناقصة.

هذه العملية يجب أن تتم لأن سطوح الكتلة المراد أســتخراجها أحيانــا تكون غير صلده نتيجة لتأثرها بعوامل التعرية الكيميائية وتكون مفتتة مفككــة

وهذا بالتالى يؤدى الى عدم تماسك الأسافين بهذه الكتلة الصخرية. بمحاجر أسوان نجد كثيرا من فتحات الأسافين وهى مستطيلة في الشكل شبه منحرفة فى مقطعها العرضي ولها أحرف وأركان مستديرة وعموما فهى تمتد من ١٦ الى ١٧,٥ سم فى الطول عند قمة الفتحة. ومن ١٤ الى ١٥ سم عند أسفل الفتحة وعمقها حوالى ١٢سم وكل فتحة تبعد عن الفتحة التى بجوارها بحوالى ١٠سم.

ونجد أيضا ان الجوانب الداخلية لفتحات الأسافين ناعمة وبناء على هذه المعلومات فإن من يشاهد أي عدد من هذه الفتحات يعرف أنها غير مناسبة للأسافين الخشبية لأن الشكل المخروطى ونعومه الجوانب قد تتسبب فى قفز الكتلة الخشبية للخارج أكثر من أحداثها ضغطا جانبيا يتسبب فى فصل الكتل الصخرية.

وهنا نحن نستشهد بتفسير جيمز هارل Jaes Harrell1999 فى نفس الموضوع فى محاجر تومبوزو الديقة Tombos and Daygah quarry حيث قرر انه فى الحقيقة بعض الفتحات قد تم قطعها فى منحدرات جرانيتية عالية الميول وهذا بالتالي يعنى أن هذه الفتحات لم يكن المقصود بها الأحتفاظ بالماء نظراً لشدة ميلها وكذلك كثير من المتخصصين وافقو على أن الأسافين الخشبية بعد تبليلها غير قادرة على كسر الجرانيت او فصل كتلة صخرية رغم أن هذه النتائج تتعارض مع العلامات التى وضعها ينزى عن وجود كثير من علامات الأسافين وجدت على أرضيات الحجرات المشيدة بهرم خوفو ولكنها تتوقف مع نتائج التجارب التى تمت بواسطة أنتون زوبر. فى العصور المتأخرة بدأت استخدام الأدوات الحديدية فى التحجير (فى محجر المسلة الناقصة) وهذا يظهر من خلال كثير من علامات الأزاميل الحديدية بالمحجر ونجد أن الدراسات النحتية والأعمال غير الكاملة التى وضعت بواسطة Edgar أدجار كلها من نفس التاريخ تفيد أن أستخدام الأزاميل الحديدية غير ممكن ولكن عمليا من المؤكد

هذه الأزاميل الحديدية فى القرن الثالث قبل الميلاد قد استخدمت فـــى عمليـــات التحجير حيث نجد ات العديد من الأسافين البرونزية والتى تعود الـــى العصــــر الصاوى Siat period (أسرة ٢١) وغيرها مصنوع من الحديد يعـــود الـــى العصور المتاخرة من تل الدفنة ومن معبد رمسيس الثانى فى طيبة، بالإضـــافة الى وجود كثير من الادلة فى اماكن مختلفة تفيد أن المصـــريين القـــدماء قـــد اســـتخدموا الأدوات الحديديـــة فـــى العصـــور المتـــأخرة فـــى رود الجمـــرة Rod-El Gamra وفى أجزاء من العصر الرومانى والعصر البطلمى لمحاجر أسوان وبناء على المشاهدات الحقلية نحن نستنتج أن عمليات التحجيـــر بهـــذه الطريقة كانت تتم كالاتى:

سلسة من فتحات الأسافين يتم قطعها طوليا فى صـــورة خـــط مســـتقيم بداخل أخدود أو قناة التحجير ثم يتم وضع أسافين حديدية أو برونزيـــة بـــداخل حفر الأسافين ثم يتم طرقها بواسطة مطارق معدنية او حجرية حتى حدوث كسر بطول خط الفتحات كما يحدث فى عصرنا الحديث .

فصل الصخور تبعاً للمفاهيم الجيولوجية:-

ويمكننا تفسير عملية فصل الصخور الصـــلبة مـــن خـــلال المنظـــور الجيولوجى وبعض الأدلة التى تنتمى الـــى الخـــواص الميكانيكيـــة والطبيعيـــة للصخور الصلبة. عموما الصخور تأخذ مسلك مختلف بإختلاف إتجاهاتها نتيجة لكونها تمثل صور غير أيزو تروبية anisotropic حيث أنهـــا تنفصـــل فـــى اتجاهات الكسور الصغيرة microfractures وكذلك للأتجاهات المعدنية لذلك فإن الصخر سوف يسهل أن ينكسر فى بعض الإتجاهات عن إتجاهات أخـــرى ونجد أن أفضل أتجاه لعملية الفصل غالبا تكون فى إتجاه الشقوق او الصـــدوع الأولية Primary Cleavage والأتجاه الثانى يكون فى اتجاه الشقوق الثانويـــة Secondary Cleavage (أتجاه البلورات) والإتجاه الثالـــث يكـــون الشـــقوق

الثلاثية Ternary Cleavage ونجد بالطبع يجب أن نشهد أن الحجـار القـديم يمتلك خبرة عالية مهارة في عمليات فصل الكتل الجرانيتية من مراقدها والكثير من أماكن الإستخراج (المحاجر) تعرض العديد من المحاولات الناجحة لعميات فصل البلوكات الصخرية وهناك بعض المحاولات الفاشلة عندما لم يقم الحجار القديم بإتباع الأوضاع المثالية لعمليات الفصل حيث أنه في حالة كون الزاويـة بين أوجه الكتلة المفصولة (خطوط القطع) أكثر من ٩٠ درجة فإن هذا الوضع يعتبر وضعا مثاليا لعمليات الفصل. أما في حالة كون الزاوية بين أوجه الكتلـة المفصولة أقل من ٩٠ درجة فإن هذا الوضع ليس مثاليا في عمليـات الفصـل وسوف يسبب الكثير من المشاكل وغالبا ما يؤدى الى فشل الحجار في أستخراج الكتلة الصخرية. محاجر أسوان تعرض عدد من المحاولات الفاشلة في عمليات فصل البلوكات الحجرية حيث نجد أن بلوك أحتمال كونه عمود بطول ٥,٦ متر وبعرض ٠,٩٧ متر فإننا نرى على الرغم من عمل فتحات الأسافين قريبة مـن بعضها لفضل هذا العمود الا أن عملية الفصل لم تنجح ومازال أكثر من ربـع العمود ملتصقاً في الصخر الأم وهذا يرجع إلي أن الزاوية بين أوجه الفصل تقل من ٩٠ درجة وأمثلة أخرى في المحاجر المختلفة بأسوان تفيد بأن قلة الزاويـة المحصورة بين أوجه الفصل عن درجة ٩٠ درجة وكـذلك وضـع الأسـافين وفتحات الفصل ليست في مستوى واحد يؤدى الى فشل فصل الكتلة الصخرية.

لهذا فإن المصرى القديم كان يقوم بعمل أخدود أو قناة وذلك لكى يضمن أن توضع كل الأسافين في مستوى أفقي واحد وكذلك كما سبق أن ذكرنا لتجنب العمل في الطبقة الصخرية التالفة والمفككة نتيجة لعمليات التعرية أو التجويـة المختلفة. وعن تاريخ علامـات الأسـافين فـإن J.Roead 1905 أقتـرح أن الإختلاف في المسافات بين فتحات الأسافين تعكس تطوراً تاريخيـا لهـا هـذه النظرية أعتمدت على أثار هذه العلامات بمحاجر أسوان. كل مرحلـة يمكـن

تمييزها بواسطة أبعاد المسافات يبين فتحات الأسافين حتى تبلغ نهايتها عنـدما توضع كما الأسافين بالقرب من بعضها فى أخاديـد متصـلة والتـأريخ لهـذه الأسافين كما يلى:

فى المرحلة الأولى وهى تعتبر أقدم العلامات نجد أن الحجار القديم لـم يكن متأكد كيف يستخدم هذا التكتيك وتخيل أن الفصل سوف يكـون أسـهل إذا وضع الأسافين عند نهاية طرفى البلوك المراد فصله Frist phase .بعد ذلك تم وضع فتحات أساقين مساعدة بين فتحات الأسافين في المرحلة السابقة وهذه هى Second phase . المرحلة الثالثة مهمة جداً حيث انه وجد على أحـد الكتـل المفصولة نقش من القرن ٢-٣ ما قبل الميلاد والذى يعنى أن فتحات الأسـافين يجب أن تؤرخ من القرن ١-٢ ما قبل الميلاد Third phase والمرحلة الرابعة والخامسة Five and four phase تعرض شكلا من الفتحـات يشـبه القمـع Funnel shaped وهى عميقة نسبيا عن الفتحات السابقة وهى تنتمى الـى ٥٠ بعد الميلاد (50A.D) من عهد Tiberius. ثم بدأت الأسافين توضع فى أخدود فى المرحلة السادسة وهذا أدى الى عمل كسر أو شرخ فى الإتجـاه المطلـوب وتسهيل هذه العملية. فى الفترة من ٧٠-٨٠ بعـد المـيلاد المرحلـة السـابعة Phase7 وهذه المرحلة حلت محل المرحلة السادسة وأستخدمت حتى القـرن الرابع بعد الميلاد حتى تكون فتحات الأسافين قريبة جدا من بعضها والمسافات بينها مكتزة مع وجود بروزات صغيرة تشاهد بين الفتحات. أما فى القرن الرابع بعد الميلاد فإن المرحلة الثانية eighth تبدأ حيث نجد العديد من الأسافين توضع مع بعضها فى فتحة واحدة أو أخدود واحد وهذه تعتبر مرحلة إنتقالية من الفترة ٤٠٠-٤٥٠ ق.م (400-450 A.D). المرحلة التاسـعة Phase nine : مـن ٤٥٠ بعد الميلاد الى الأمام حيث نجد أن الأسافين توضع كلها فى أخدود واحد متصل والمرحلة الأخيرة وهذه المرحلة ظهرت فى القرن ١٩ ,وهى عبارة عن

مجموعة من الفتحات الصغيرة مخروطية الشكل صغيرة الحجم على أبعاد صغيرة جدا من بعضها. كثير من المشاهدات للأدوات القديمة وأثارها على سطوح الكتلة الحجرية الأثرية غير تامة النحت تظهر إن الحجار والبناء المصرى كان قادرا على قطع وتشكيل بلوكات الجرانيت بواسطة ألته الحفر الحجرية وكذلك المطارق المطاحن فى العصر الفرعونى بينما استخدمت طريقة الأستافين فى العصور المتأخرة هنا نحن نميز بين نوعين من الطرق من عمليات أنتاج التوابيت أو الأحواض غير كاملة النحت من العصور المختلفة. بلا شك أن المصريين القدماء أستخدموا نفس هذه الطرق فى مختلف العصور فى عمليات التحجير الخاصة بنفس أنواع هذه الصخور .

الطريقة الاولى: طريقة الحفر والطحن Drilling and poundeed

وهذه الطريقة استخدمت فى العصور الفرعونية لإنتاج التوابيت الجرانيتية ونجد أن نظام حفر الجزء الداخله لهذه التوابيت التى من الصخور الصلبة تتم على مراحل عديدة بإستخدام ألة الحفر الحجرية كما ذكر Stock.1986 حيث نجد أن ألة الحفر تستخدم لإزالة الداخلي للتابوت للعمق المطلوب حيث نجد فى التوابيت غير كاملة الصنع سلاسل من الحفر المصنوعة بواسطة ألة الحفر القوسية هذه الأله تترك أثار يسهل التعرف عليها وهى فى صورة سلاسل من القطوع الرأسية المتوازية كما لو كان الجزء الداخلى للتابوت قد تم قطعه بواسطة مغرفة جين صغيرة.

الطريقة الثانية وتسمى طريقة الأساقين:

وقد تم استخدامها لأنتاج الأحواض من العصر الرومانى وهى مازالت راقدة فى محاجر الشلال تشهد على طريقة صنعها والخطوة الأولى لأنتاج هذه الأحواض هو رسم الأسكتش الخاص بالجزء الداخله المراد تفريغه بواسطة

المغرة ثم بعد ذلك يقوم الحجار القديم بعمل أخدود أو قناة حوالي ٢سم في العمق حول الجزء المراد أقتطاعه (القلب) بواسطة الأزاميل الحديدية ثم بعد ذلك يقوم العامل بعمل العديد من فتحات الأساقين فى خطوط عديدة تقسم الجزء الداخله من الحوض (القلب) على مسافات متساوية. كل البروزات التى بين فتحات الأزاميل التى على خط واحد يتم أزالتها. بواسطة الأزاميل الحديدية حيث يتحول كل خط بعد خطوط الفتحات إلي أخدود وبناء عليه نجد أن الجزء المراد اقتطاعه في الحوض قسم إلي مجموعة من الأخاديد والعواض في النهاية يتم أزالة هذه العواض بواسطة الأزاميل وتكرر هذه العملية حتي الوصول إلي العمق المطلق .

بلا شك أن تشكيل الأحجار الصلبة التي استخدمت في صناعة المباني يعتبر مشكلة للبناء القديم والنحات على حد سواء ولكن بناء على هذه الدراسة فنحن نقتصد أن الأحجار الصلبة مثل الجرانيت أو القرانو ديوريت والبازلت قد تم اقتطاعه بسهولة بواسطة آله الحفر والمطارق الحجرية في العصر الفرعوني. في حين في العصور المتأخرة والعصر الروماني أستخدمت طريقة الأساقين لأقتطاع هذه الصخور . العديد من العلامات المتبقية بمجر المسلة الناقصة تثبت أن عجل تسوية وتشكيل السطوح قد تم بواسطة العديد من الفتحات في خطوط متوازية توزع على السطوح غير المستوية حيث نجد أن المسافة بين هذه الفتحات من ٣,٥ سم إلي ٥ سم في الطول ومن ٢ إلي ٢,٥ سم في العمق ، هذه الفتحات احتمال أنها قد تم صنعها بواسطة آلة الحفر في العصر الفرعوني في حين استخدمت الأزاميل الحديدية في العصور المتأخرة .

بعد عمل هذه الفتحات ، يتم أزالة البروزات التي تتم بواسطة الطرق على الأزاميل من أحد جوانب هذه الفتحات بواسطة مطارق حجرية في العصور الفرعونية وبالأزاميل والمطارق المعدنية في العصور المتأخرة .

هذه العملية يتم تكرارها حتي يتم تسوية هذا السطح والشكل النهائي في تهذيب هذا السطح يتم بأستخدام كرات الدوليريت التي يتراوح وزنها أكثر من ٦ كيلو جرام لتسوية السطح حتي يصبح سطحا متساوي ناعم .

وعملية الأختبار لأفقية هذا السطح تتم بواسطة غمس لوح خشبي في المغرة الحمراء ووضعها على السطح المراد أختبار تسوية أي بروزات أو مناطق يتم ملامسها مع هداه اللوح ويلون بالمغرة يجب تسويته إلي باقي إلي أن يتم تسوية سطح الكتلة وقد ذكر أيضا بترس من (Petrie 1853-1942) إن هناك آلة أخري أحتمال استخدامها لتسوية أسطح الأحجار وهي طريقة boning rod حيث أثنين من العصيان الطويلة المتصلة على قيمتها بواسطة خيطا يتم شدة على السطح المراد اختيار تسويته بواسطة رجلين ورجل أخري يقوم بتحريك عكا سالة بنفس العصيان السابقة على سطح الكتلة الصخرية على الخيط المشدود بين العصيان السابقة . إذا كان هناك مازالت بروزات فنجد أن هذه العصا سوف تمر فوق هذا الخيط أما إذا لم تمر هذه العصا وأقترضها الخيط فهذا يدل على تسوية السطح في هذا الجزء وهذه الطريقة يتم عملها على جميع أركان الكتلة الصخرية لضمان تسويتها .

التفاصيل الصغيرة والزخارف والنقوش الهيروغليفية تتم بأستخدام آلة حفر قوسية صغيرة وأزاميل حجرية ونحاتات في العصور الفرعونية أما في العصور المتأخرة أستخدمت أزاميل الحديد .

حيث نري العديد من الأدلة عن آلة الحفر في صورة يقع بيضاء على التماثيل والتي مازالت تري رغم عمل الصقل لها في مجر المسلة وجدت العديد من النحاتات أو الأزاميل من خام الهيمايتت والتي لها حد مذبب أو حد يشبه السكين وهو له صلابة من ٥,٥ إلي ٦,٥ حسب مقياس موهي Mohs Scal احتمال أن الأزاميل أو النحاتات التي من خام الحديد (الهيماتيت) أستخدمت

لنحت التفاصيل الدقيقة بالتمثال أو المسلة في المجر وهذه العملية ممثلة في المقابر القديمة حيث يري النحاتين وهم يستخدمون أدوات حجرية لنحت رأس تمثال في النقوش الجدارية بمقبرة نفر أم رحو Nefer um Raho Tomb بالمتحف المصري . ونجد على نقوش وادي الحمامات نقش يحتوي على هذه العبارة أي أمون أعطي الحياة إلي عمال الأدوات الحديدية يتامي Ptahi ، أين عمال الحديد ..... Engelbach, 1922) . وبناء على هذا نحن نعتقد أنه في العصور الأولي أستخدمت الأزاميل والنحاتات المصنوعة من خامات الحديد الطبيعية (الهيماتيت) والأحجار الأخري بينما في العصور المتأخرة تم استخدامها الأزاميل الحديدية .

لا شك فإن المحاجر قد عملت كأستوديوهات للنحاتين والتي فيها القطع النحتية يتم عمل لها التفاصيل الدقيقة من تسوية نقوش دقيقة وبناء عليه يتم اكتمال أعمال النحت تماما للقطع الفنية فنل عمليات التفتت (Klemm , 1998) وهذا احتمال المقصود به انقاص تقص العمل النحتي لتسهيل عمليات التنقل ولمعرفة أي عيب بهذه المنحوتات قبل نقلها إلي أماكن أقاضتها ويشهد على ذلك مجر الكوارتزيت على شاطئ النيل الغربي بمدينة أسوان والذي يتواجد بين الجبانة القديمة عند قبة الهوا وكينسة سانت سيمون في هذا المجر يوجد الجزء العلوي من أحدي المسلات مع هريمها ، حيث نجد أن بدن المسلة منقوش من ثلاثة جوانب بينما الجانب الرابع غير منقوش مما يدل على أن عملية النحت للنقوش كما تتم بالمجر ، وكذلك مناظر الصقل من الطريق الصاعد من أوناس Cause way of unas وأيضا من معبد حتشبسوت تدل على أن الأعمدة والمسلات كانت تشكل إلي شكلها النهائي في المجر بأستثناء عمليات الصقل قبيل عملية النقل .وأيضا يقول (Klemm , 1998) أن هناك العديد من

المنحوتات الأثرين التي تركت ومازالت موجودة بالمحاجر بأسوان قد تم نقسها ونحتها بداخل المحجر .

الخطوة الأخيرة من خطوات تشكيل المنحوتات الأثرية هي أضفاء اللمعة عليها عن طريق تلميعها هذه العملية كانت تتم بأستخدام جلاضاته حجرية العديد من هذه الجلاضات وجدت بمحجر الفنيتن وبحر المسلة الناقصة وهي تأخذ شكل نصف بيضاوي half ellipsoidal shape .ويتم العمل به عن طريق اليد مباشرة دون وجود يد له وهذه الجلاضات يتم صناعتها من أحجار مختلفة الحجم الحبيبي ومن صخور مختلفة حيث وجدت جلاضات من الحجر الرملي دقيقي الحبيبات والحجر الرملي خشن الحبيبات والكوارتزيت silt stone وكذلك granite .

عمليات التلميع تتطلب أختيار أداة التجليخ وعدد مراحل عمليات التجليخ للحصول على أسطح لامعة ، نحن نعتقد أنه استخدم جلاضات ذات حجم حبيبات كبيرة الحجم في بداية مراحل التلميع مع استخدام مادة حكاكة مثل الرمل مع وضع الماء لتسهيل هذا العمل ولكن في نهاية المراحل فإنه تستخدم جلاضات ذات حجم حبيبي صغير وهذه العملية ممثلة في مقبرة Wib Am Nifrt ويب أن نفرت ومقبرة رخ مي رع Rekhmira بمدينة القرنة حيث نجد في مقبرة رخ مي رع أثنين من الصناع يمسكا بأيديهما بلاضة نصف بيضاوية الشكل لتنعيم وتلميع تمثال أبو الهول وكذلك في مقبرة ويب أم نفرت نجد أثنين من الضاع يقومو بتلميع تابوت حيث نجد أن أحد الصناع يمسك في يده جلاضة حجرية لتلميع التابوت وفوق هذا الرسم يوجد نفس مكتوب بالكتابة الهيروغليفية يقول لمع التوابيت – صب الماء وضع الرمل (سليم حسن ٢٠٠٠).

فن النحت عبر العصور التاريخية

تتميز مصر منفردة بين بلدان العالم بأنها مهد الحضارات الإنسانية التي قامت على أرضها تتابع تاريخي تسجله المعالم الشامخة لأقدم مدينة قدمت للبشر عامة، وللحضارة العالمية الحديثة العديد من العطاءات والمفاهيم في العمارة والفنون ومن بين هذه العطاءات الآثار الرخامية حيث استخدموا مادة الرخام في مجالات عديدة في العمارة، والفنون منذ العصور الفرعونية وحتى العصر الحديث، وذلك لما تتميز به مادته من الشكل الجميل والرونق الجذاب، ولسهولة نحته، وصقله ولما يتميز به لونه الأبيض إذا كان نقيا، واتخاذه ألوانا متعددة إذ احتوى على بعض الشوائب الموجودة فيه.

ويختلف الرخام Marble في مفهومه من الناحيتين الجيولوجية والدراجة: فمن الناحية الجيولوجية، والتي تحدد لنا المعنى الصحيح له إذا يقصد به الصخر المتحول عنة الحجر الجيري بفعل الضغط أو الحرارة أو بفعلها معا. أما المفهوم الدارج لكلمة الرخام فهي في الواقع تطلق على مجموعة من الأحجار، والتي يمكن تسميتها بأحجار الزينة، والتي تشتمل على الرخام بمفهومه، وسوف يتم دراسة الرخام بمفهومه العلمي، ومدى استخدامه علي مدي العصور التاريخية سواء في العمارة أو الفنون. ونظرا لارتباط أعمال الرخام بفنون النحت فى معظمها لذا سوف يتم دراسة استعمالاته خلال العصور التاريخية من خلال دراسة فن النحت فى هذه العصور.

قواعد النحت فى الفن المصري:

تميز الفن المصري القديم فى نشأته بعاملين هامين، أولهما يتعلق بالقواعد العامة التي التزم بها الفنان عند تنفيذه لأعمال النحت منذ العصور التاريخية وحتى نهاية العصر الفرعوني. وثانيهما الدين حيث أن هناك ارتباط

وثيق بين الكهنة والفن وقد اتسم النحت فى هذه الفترات بميزات نابعة من تأثير هذين العاملين.

فعلى سبيل المثال سيطر الفنان على الحركة بوضع جميع خطوط التمثيل فى الأوضاع المتوازية مع القاعدة حيث يخيل المشاهد إلى جسم التمثال فيما عدا الحالات النادرة كما لو أنه ينظر إلى جزئين متساويين ومتماثلين ونظرا لإستخدامه الأدوات البدائية البسيطة اضطر إلى أن يصرف اهتمامه إلى صلابة التماثيل وتماسكها فأكثر من نقط التحميل وتجنب أي مظهر من مظاهر الرقة والبعد عن الأجزاء البارزة ما أمكنه ذلك. فالجمال والرغبة فى إظهار حركة قوية أمور لم يغفل المثال المصري عن ملاحظتها ولكن صلابة المادة التي نحتت فيها والغرض الديني والجنائزي الذي يسعى إليه فى عمله اضطره للبعد عن ذلك. أما بالنسبة للمراحل الفنية التي اتبعت فى فن النحت فقد كان لابد للفنان المصري الذي يقوم بنحت الحجر أن يكون على دراية واسعة بفن الرسم لأن كل عمل من أعمال النحت الغائر أو النحت البارز أو الكامل كان يقوم على رسم الخطوط الأساسية وذلك لإرشاد أزميل النحات، وقد وصل الفنانون فى نحت التماثيل الكبيرة إلى مهارة فائقة ومن مواد صلبة حتى وصلوا إلى أعلى قمة.

<u>استعمالات الرخام فى العصر الفرعوني:</u>

استعمل الرخام على نطاق ضيق في عصر ما قبل الأسرات وأوائل عصر الأسرات فى صناعة الأواني كما استعمل فى صناعة التماثيل فى غصون الأسرتين الثامنة عشر، والتاسعة عشر، والأمثلة على ذلك هي تمثال تحتمس الثالث المنحوت من رخام أبيض مجزع تجزيعا رماديا وهو الآن بالمتحف المصري وعدد من التماثيل الكبيرة بمعبدي الأقصر والكرنك على التوالي وعدة

تماثيل بالمتحف المصري. وقد سجل التاريخ استخدامه فى بناء المعابد القديمة فى القدس القديمة وهذا يثبت أن الرخام عرف منذ آلاف السنين وكان وسيلة للفنانين فى التعبير سواء في فن العمارة وتشيد المعابد وقصور الملوك منذ خمسة آلاف عام كما استخدم فى تكسية الحوائط ولعبت تجزيعاته دورا جماليا فى هذه الناحية.

استخدام الرخام فى العصر اليوناني الروماني:

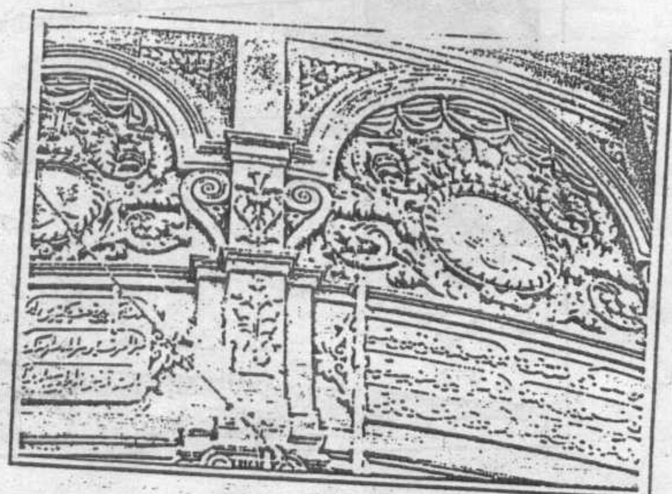
فى هذا العصر نجد أن الرخام أستخدم على نطاق واسع سواء فى العمارة أو الفنون ففي مجال العمارة كثر استخدامه فى تجميل الواجهات كما غلب استخدامه فى الأعمدة ومنها العمود الدوري والأيوني أما العمود الكورنثي فقد بلغ مدي رقية فى العمارة الرومانية. ويلاحظ فى الأعمدة اليونانية أنها لم تكون على نفس المستوي الرفيع الذي وجد فى العمارة الرومانية، ومن الأمثلة الرائعة معبد البارثينون فى أثينا (٤٣٣ – ٤٣٢ ق.م)، وتبين المحاولات الجمالية مدى ما وصل إليه الإغريق من القدرة الفنية، ووسامه الذوق فى تصميم وإنشاء هذه المعابد، كما استخدم الرخام فى الحوائط والأعمدة فى المباني، والبازليكا.

أما استخدام الرخام فى الفنون فلقد كان الموضوع الرئيسي فى الفن اليوناني هو الجسم البشري بما فيه من نواحي جمالية، وذلك فى عمل التماثيل وأهم موضوعين عولجا فى الفن اليوناني هما الأساطير، والحياة اليومية فلكي نعرف ما تعنيه المناظر المنحوته يجب الإلمام بالأساطير اليونانية وما تحكيه عن الآلهة والأبطال، وكان الغرض من فن النحت فى العصر اليوناني دينيا ولا سيما في عصوره الأولى إذا كانت الأعمال الفنية من التماثيل، وغيرها تزين المعابد. كما أستخدم أيضا فى إحياء ذكرى الأحداث الهامة كالانتصارات فى الحروب أو في الألعاب الرياضية. أما انعادات الجنائزية فلقد كان من حق الفرد

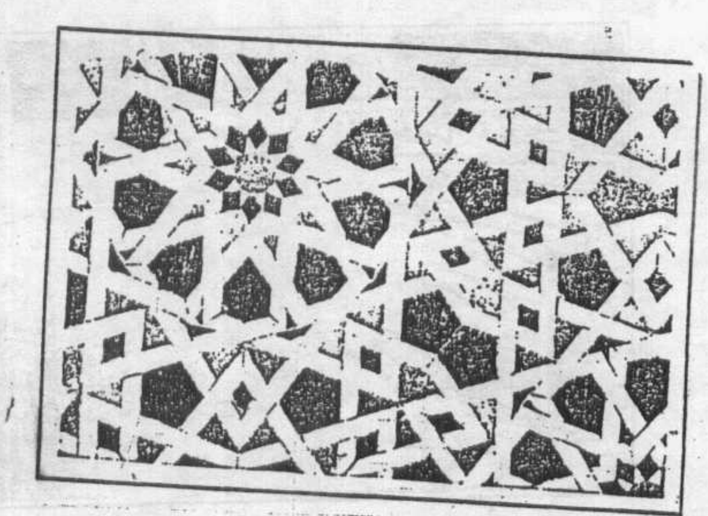
أن يكون له تمثال وشاهد ينصبان فوق قبره كما ظهرت إبتـداءا مـن القـرن الخامس قبل الميلاد عادة إقامة التماثيل للشخصيات الهامة بواسطة أقـاربهم أو عن طريق الدولة وذلك فى الميادين، والأماكن العامة، وغالبا ما كانـت هـذه التماثيل الرخامية تلون أو تكون هناك مواد تضاف من المعادن لعمل الأقراط أو لجام الحصان أو الرمح أو السيف ولم يبق من هذه الأشياء إلا الثقوب التى تدل على مواضيعها، وبينما نجد أن التماثيل المصرية القديمة بها عمود يسند الظهر كما يغطي جسم على الأقل بإزار إذ بنا نجد التماثيل اليونانية خالية مـن هـذا العمود السائد والرجال يظهر عاريا تماما. وقد حاول المثال اليونـاني إظهـار التمثال فى الشكل الطبيعي وأمكنه بعد إلمامه بتركيب الجسم البشري وتكوينه أن يصور الحركات والأحاسيس وإظهار الملابس وتقاطيع مما أدى إلى الإحسـاس بمعني الحركة والتوازن.

ويضم المتحف اليوناني الروماني بالإسكندرية من ملامح ومميزات هذه الفتـرة من خلال مقتنياته من التماثيل، والأوانـي والأدوات، والتوابيـت، واللوحـات الرخامية التي تنتمي لهذه الفترة.

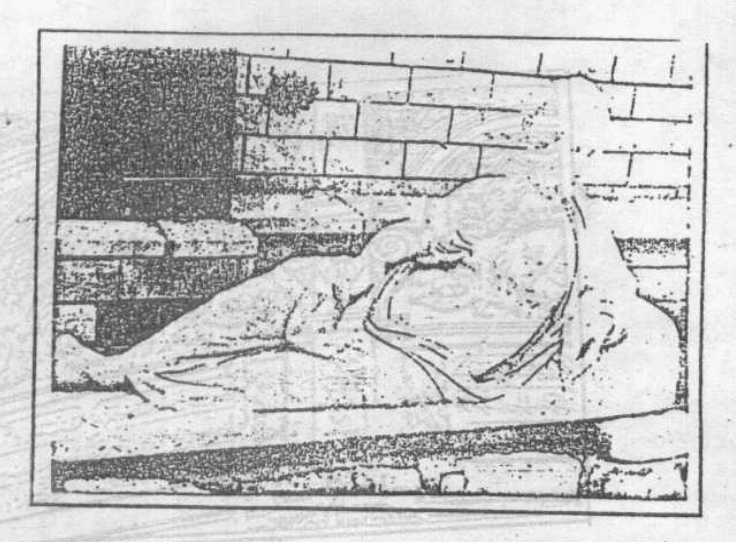
كما تعرض الكنائس المصرية التى عاصرت هذه الفترة أشـكالا مختلفـة مـن استعمالات الرخام حيث استخدم سواء فى عماراتها كبلاطات تكسو الحوائط أو أعمدة أو كفسيفساء رخامية تزين أرضيتها وجدارنها أو في محاريبهـا ويضـم المتحف القبطي مجموعة من تيجان الأعمدة الرخامية والتي زينت بالزخـارف النباتية أو الهندسية.



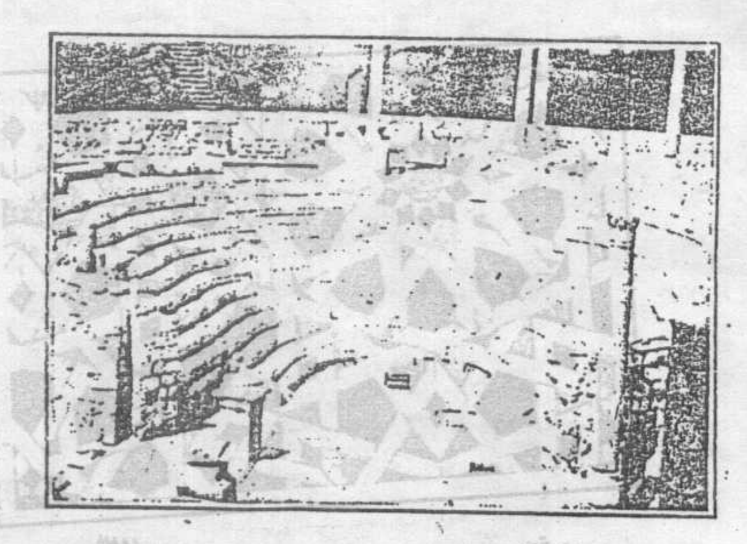
(١١)
صورة يوضح واجهة سبيل سام بن نوح بالقاهرة حيث نلاحظ وجود الزخارف النباتية والكتابات منفذة بالحفر البارز على الرخام.



(١٢)
صورة توضح فسيفساء رخامية فى محراب الجامع الأزهر.



صورة ١٣ توضح تمثال رخامى من العصر الرومانى موجود بالمتحف اليونانى الرومانى بالإسكندرية.



صورة ١٤ توضح المسرح الرومانى بكوم الدكة بالإسكندرية يرجع للعصر الرومانى.

استخدام الرخام فى العصور الإسلامية :

. اهتم ولاة مصر وحكامها بفن النحت على الأحجار. منذ وقت مبكر وقد لعب فن النحت فى هذه الفترات وخاصة على الرخام دروا هاما فـــى تجميـــل الواجهات وتزيين القصور الفاخرة كما لعب دروا كبيرا معماريا وذلك من خلال استخدامه فى الأعمدة وتيجانها كما أستخدم أيضا فى الفنون التطبيقية كالمنـــابر والأواني والأحواض والأزيار والكلجات وفى الفسيفساء الرخامية (صـــورة٣) والأسبلة صورة (٤) .... الخ. ونظرا لتعدد استخدامه فى العمارة أو الفنون فى العصور الإسلامية فسوف تسهل دراسته من خلال استخدامه فى النحـــت عبـــر العصور الإسلامية بحيث لا تخلو أيضا من الإشارات الى الزخارف والكتابـــات التى نفذت عليه خلال هذه الفترات.

١- فن النحت فى العصرين الأموي والعباسي (القرن ٨-١٠م)

قد عرف فن النحت فى العصور الإسلامية الأولى من الزخارف التـــى بقيت فى القصور والمنازل والمساجد تدل هذه الآثار على عظمـــة الزخـــارف وروعتها وقد استمرت الأساليب الأموية فى النحت على الحجـــر متبعـــة فـــى العصر العباسي ومن أهم الموضوعات الزخرفية تلك التى توضح نشأة أشـــكال التوريق Arabeseque كما أن بعضها مستمد من الأساليب الفنيـــة الســـابقة وأخصها أشكال محورة عن ورقة شوكة اليهـــود Acanthus كمـــا أن بعـــض تيجان الأعمدة زخرفت بأشكال المراوح النخيلية الكاملة أو أنصـــافها وتوجـــد نقوش كوفية ترجع الى هذه الفترة على لوحات رخامية فى جـــامع أحمـــد بـــن طولون بالقاهرة.

وتحدثنا المراجع على أن مقياس النيل بالروضة وهو من أقدم المنشآت المدنية فى مصر (٢٤٧هـ/٨٦١م) كان يزين القناة التى تصل بئـــر المقيـــاس

بالنيل من الرخام كعلامة لوصول منسوب النيل الى حد معين كما عرف عن خماروية بن أحمد بن طولون ولعه بإتخاذ التماثيل من باب اللهو والزينة كما إعتنى بصناعة التماثيل فى العصر الإخشيدي.

٢- فن النحت في العصرين الفاطمي في مصر (من القرن ١٠-١٢م)

بقيت أثار القاهرة التي ترجع إلى النصف الأخير من القرن العاشر والحادي عشر والتى بها مجموعة من الزخارف التى توضح كثيرا من العناصر المميزة للعصر الفاطمي حيث ينضح منها تطور أشكال الزخارف الجديدة وخاصة أشكال التوريق.

وظهر في النحت الفاطمي بالأساليب الفارسية فضلا عن بعض العناصر التى جلبها الفاطميون معهم من شمال أفريقيا، كما تميزت الزخارف الفاطمية بدقة الحفر والميل نحو التمثال والتقابل وتطوير الزخارف الهندسية، والنباتية، والحيوانية، والمبالغة في زخرفة الخط الكوفي بأشكال الأوراق والأزهار وعثر في أنقاض بعض العمائر المملوكية مثل خانقات بيبرس الجاشنكير والسلطان فرج بن برقوق على نماذج من النحت ترجع للعصر الفاطمي والنماذج المعروفة التى تنتمي لهذه الفترة ليست كثيرة العدد منها لوح رخامي في متحف الفن الإسلامي عليه رسم سبع نقش نقشا كبير البروز.

كما استخدم الرخام في عمائر العصر الفاطمي فى الجامع الأزهر ممثلا في الأعمدة الرخامية كما تذكر المراجع أن الرخام الفاطمي المزخرف كان ذا أهمية كبيرة وكان أمراء المماليك يحرصون على اختزانه.

٣- فن النحت في العصر الأيوبي والمملوكي (نهاية القرن ١٢ – ١٥م)

ظلت الأساليب الفاطمية مستمرة في فن النحت والفنون الأخرى، ويحتفظ متحف الفن الإسلامي بالقاهرة ببعض اللوحات الرخامية المأخوذة من

العمائر المملوكة وقوام زخارفها فروع نباتية متقاطعة بشكل لـوزات بإحـداها صورة حوتين يبتلعان شخصين كل منهما يمسك كأس وفوقهما شكل حيوان لـه جناح ونلاحظ في هذه الزخارف والرسوم تطورا عن أسلوب العصر الفـاطمي لذا يمكن إرجاعها الى أولخر هذا العصر أو إلى العصر الأيوبي.

وفي سنة ١٢٥٠م بدأ حكم المماليك ويعتبر عصرهم بمثابـة العصـر الذهبي للكثير من الفنون ويفسر ذلك بأن سلاطين المماليك اشـتهروا بـالثروة والمال نتيجة الدور الذى قامت به تلك الدولة في النشاط التجاري بـين الشـرق والغرب ومع المال ويكون البذخ والرغبة في التأنق والتفنن واقتناء التحف هـذا إلى جانب أن الفنان لا يقنع بالجهد البسيط في عمله إنما يبالغ وهـو مطمـئن تماما إلى أنه سيجد من التقدير وحسن الأجر ما يحفزه إلى بـذل المزيـد مـن الجهد.

ففي العمارة تشهد عمائر العصر المملوكي التى تزدان بها القاهرة اليوم من مساجد ومدارس وأضرحة وسبل وحمامات وبيمار ستانات وغيرهـا مـن الذوق الجميل والرغبة في الإبداع.

وكانت الأعمدة الرخامية فيها تتكون من ثلاثة أجزاء ترتبط مع بعضها البعض وقاعدة العمود الإسلامي غالبا على شكل ناقوس مقلوب أو شكل رمانى أما البدن فعلى شكل أسطواني علاوة على أشكال أخرى مثمنه الشكل تكسـوها زخارف نباتية أما تيجان الأعمدة فيغلب عليها طابع الزخرف النباتية المحـورة كما زخرفت الأرضيات والوزارات بالرخام الملون وتشهد المنـابر الرخاميـة والأفاريز المنقوشة والألواح الرخامية فى الأسبلة والشبابيك على مهارة الفنـان فى العصر المملوكي ثم يجـيء عصـر المماليـك البرجيـة أو الجراكسـية (١٣٨٢-١٥١٦م) ويرجع الى سلاطين هذا العصر الفضل فى إنشاء مجموعـة من المبانى المعروفة بأسم مقابر الخلفاء وتحتفظ مساجد القاهرة ومتاحف العالم

بعدد وفير من الأحجار المنحوته والأواني الحجرية التى ترجع الـــى العصـــر المملوكي وأغلب هذه المواد مصنوعة من الرخام وتشتمل على منابر ونافورات وأحواض وجرار للمياه وكلجات وبمتحف الفن الإسلامي بالقاهرة عددا كبيرا من المنحوتات الهامة من القرنين الرابع عشر والخامس عشر وعددا مَـــن الجـــرار البيضاوية والنقوش المنزوعة من المساجد المختلفة. كما اســـتخدم أيضـــا فـــى الأرضيات وذلك لألوانه المتعددة وصلادته بالإضافة الى ملمسه الناعم وبريقـــه الطبيعي وسهولة تنظيفه.

٤ - استخدام الرخام فى العصر العثماني

لعب الأتراك العثمانيون دورا كبيرا فى تاريخ الفن الإسلامي ونشـــروا طرازا ظل طوال ثلاثة قرون ويرجع الفضل فى التطور الفني إلى اعتناء الولاة العثمانيين بالفن وقد انتشر هذا الطراز فى العمائر القائمة بمدينة القـــاهرة مـــن مساجد، ومنازل، وأسبلة، كما إنتشر فى المتحف المنقولة.

وقد خلف لنا المرخمون فى العصر العثماني فى مصر أنواعا مختلفـــة من أعمال الرخام التي نفذت برخام ملون وكذلك علـــى رخـــام غيـــر ملـــون، مستخدمين فى ذلك ألآت مختلفة الأنواع (شكل١٩)، وقد استخدم الرخام كذلك فى زخرفة وتجميل واجهات المباني وبناء النصب التذكارية فى الميادين وفى مجال الزخارف التشكيلية وفن النحت والحفر والتطعيم والتلبيس، والتمثيل، والكرانيش علاوة على التكسيات وتصنيع قطع الفسيفساء وترصيعها كخامة تلوين طبيعية.

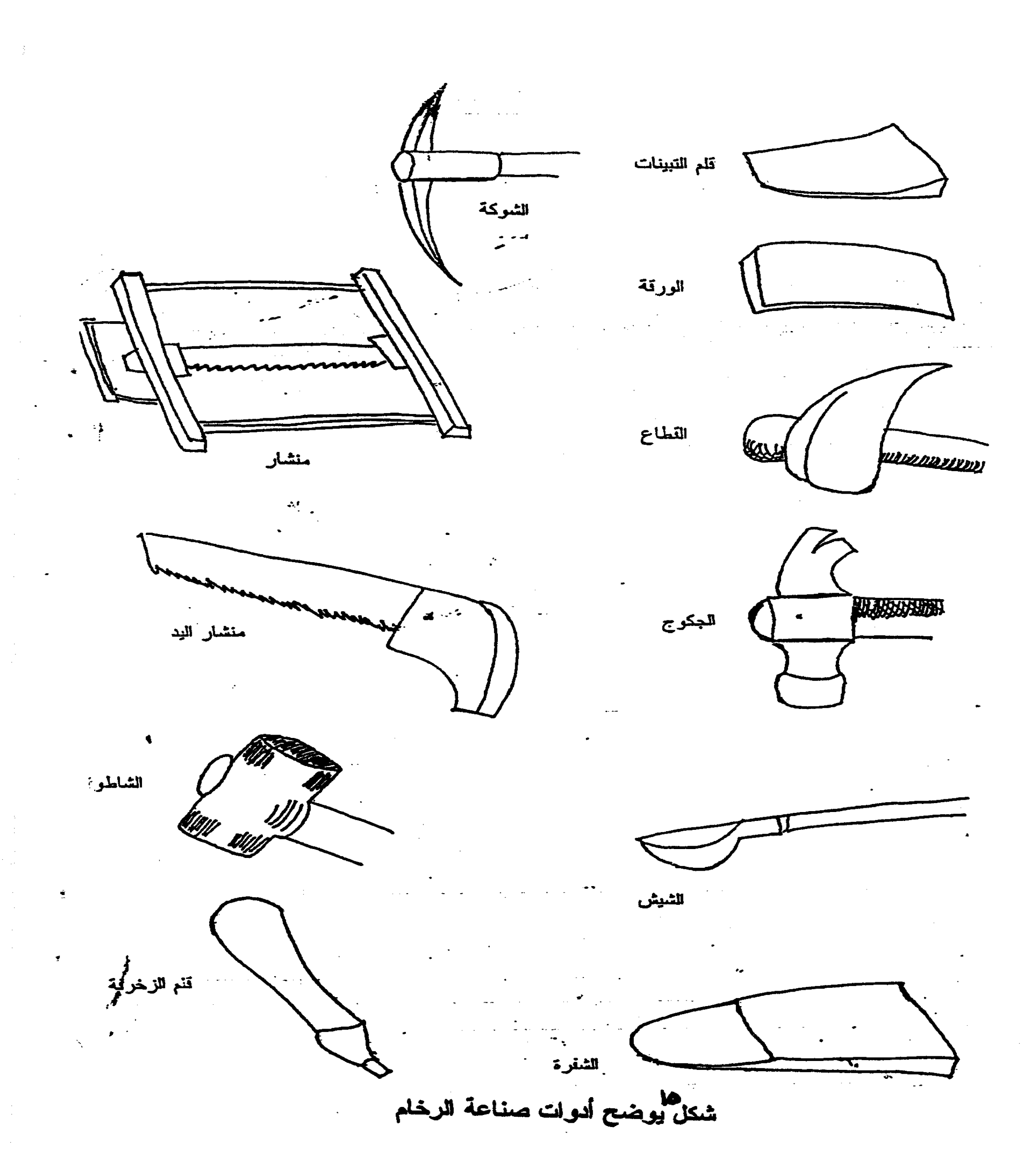
كما أستخدم فـــى الأرضـــيات والمحاريـــب، والمنـــابر، والمـــداخل، والسلسبيلات، والأزيار، واللوحات، وتراكيب القبور، ونلاحظ نـــدرة اســـتخدام الرخام فى التماثيل وربما يرجع ذلك لشيوع النظرة الدينية فى التصوير.

ونلاحظ استخدام الرخام بكثرة فى الأسبلة بكافة طرازها وأنواعها حيث استخدم فى ألواح التسبيل وفى دخله الشازروان وتغطية فوهات الصهاريج كما زينت باللوحات الرخامية التي حوت الزخارف النباتية والهندسية كما استخدم فى تبليط السبل واستخدم فى العمارة فى الأعمدة والأعتاب، والتيجان

ومن القطع الفنية ذات الزخارف الحيوانية المنحوته ألواح من الرخـــام كانت تركب فى أسبلة القاهرة تزخرفها رسوم بارزة على هيئة زخارف كما أن هناك سلسبيلات عليها رسوم فهود وسباع تتعقب غزلانا تعدو وألــواح عليهــا كتابات كوفية وكلها موجودة فى متحف الفن الإسلامي.

مما يدل على كثرة استخدام الرخام فى العصر المملــوكي لدرجـــة أن أصبح يصنع منه سرير الملك كما أستخدم فى زخرفة المحاريب ومنها زخارف محراب مدرسة السلطان الأشرف برسباى حيث يتكون المحــراب مـــن حنيـــة نصف دائرية يكتنفها عمودان من الرخام ويكسو الحنية أشرطة من الرخام تبدأ من أسفلها رأسية ثم منطقة وسطي من زخارف الدقماق المعروفة فى المعـــادن المملوكية أما الطاقية فهي متأثرة فى زخارفها بمحراب مدرسة السلطان حســـن على هيئة أشرطة رخامية متعددة الألوان بالطريقة الدالية.

كما انتشرت الفساقي وسط الدرقاعات بـــين الأيونـــات فـــى القصـــور المملوكية وغيرها لتلطيف الجو فى الصيف وكانت لها أشكال متعددة وقد تفـــنن المرخمون فى صناعتها من الرخام المختلف الأنواع، كما عملت الســـدلة مـــن الرخام وهى المرتبة الصغيرة المرتفعة عن الأرضية، كما استخدم فى النصوص التأسيسية حيث نراه فى النص التأسيسى بصحن مدرسة الغورى.



شكل ١٥ يوضح أدوات صناعة الرخام

وقد وصلنا أسماء كثيرة من صناع الرخام منهم عبد القادر النقاش، على بن عمر، محمد بن أحمد، ....الخ. كما كان هناك وظائف مساعدة وتكميلية لوظيفة المرخم وهى الرصاع والمذهب والنحات والنقار والنقاش والمطعم والخطاط، والرسام والمرمم.

الزخارف والكتابات على الأعمال الرخامية:

١- الزخارف النباتية:

لعبت الزخارف النباتية دورا هاما فى زخرفة أنواع الأعمال الرخامية بالقاهرة فلم يخل عمل منها وكانت أهم الأساليب والعناصر الزخرفية النباتية على هذه الأعمال هي:

أ- زخرفة الرومي (الأرابيسك العثمانية):

وقوامها فروع نباتية مصنوعة بطريقة لا تخضع لنظام الطبيعة وقد أستمدها الأتراك من السلاجقة وقد استخدموا بطريقة تقليدية وهو ما يسمي بالأرابيسك وهو نوع من الزخارف النباتية قلده الأوربيين ويتكون بالإضافة الى الأفرع والأوراق النباتية من فصوص وأنصاف مراوح تتداخل وتتشابك معا بطريقة زخرفية متسقة، ومع تطورها فى العصر العثماني تداخلت الرومي فاستخدموا فيها التكرار والتقابل والتناظر حتى يمكن أن نطلق على الرومي الأرابيسك العثمانية.

ب- زخرفة الهاتاى:

وتشبه الرومي من بعض الوجوه ولكن تتجلى فيها الروح الصينية وقوامها الزهور الصينية المحورة والأوراق المشرشرة بالإضافة إلى ذلك فقد وجدت زخرفة الباروك والروكوكو .

الزخارف الهندسية:

وقد استخدمت الزخارف الهندسية التي اعتمدت على الخطوط المتقاطعة والمنحنية في معظم أسقف الأسبلة ولم تستخدم كوحدات زخرفية قائمة بذاتها بقدر ما كانت تستخدم في تحديد الوحدات الزخرفية وذات العناصر النباتية المختلفة وقد استخدمت أيضا مثل هذه الخطوط منفذ على الحجر والرخام بالحفر البارز وتوجد فى سبيل تغري بردى.أما الحشوات المزخرفة سواء بالزخارف الهندسية أو النباتية المنفذة بالحفر البارز على الرخام فنجدها بمعظم واجهات الأسبلة حيث اتخذت الأشكال السداسية والثمانية والأشكال النجمية بأنواعها والزخارف المجدولة ورؤس الحراب وهي التي تعرف بالدقماق.

الكتابات على الأعمال الرخامية:

وقد نفذت الكتابات على أعمال الرخام فى القاهرة العثمانية بارزة فى أغلب الأحوال وقد اختلفت الخطوط التي دونت بها الكتابات وهي خط الثلث فورد على التكسيات على المحاريب وعلى معظم اللوحات التأسيسية والخط الكوفي وقد استعمل بأشكاله المختلفة من مورق ومربع وهندسي قائم الزوايا الخط النسخ وخط المثنى (الكتابة المنعكسة) والخط الغبارى، الديواني والخط الفارسي.

الخواص الطبيعية والميكانيكية والحرارية للأحجار
Physical , Mechanical and Thermal Properties of Stones

لابد للقائمين بصيانة الآثار الحجرية وعلاجها معرفة الخواص الطبيعية والميكانيكية والحرارية للأحجار المراد علاجها وذلك لأن معرفة هذه الخواص المختلفة يفيد في تشخيص حالة الإصابة بالإضافة إلي أنه يفيد في اختبار المواد المناسبة المستخدمة في علاجها وتقويتها ومدي توافقها الحراري وسلوكها الميكانيكي مع مادة الحجر وكذلك الطرق المناسبة لتغلغلها داخل الحجر وتشبعه بها .

وتتوقف الخواص الفيزيائية والميكانيكية للأحجار على طبيعة الحبيبات المكونة للحجر كذلك على طبيعة ومقدار المسام داخل الكتلة الحجرية هذا إلي جانب طبيعة المواد الرابطة بين الحبيبات . وفيما يلي أهم هذه الخواص :-

١- الخواص الطبيعية Physical Properties

وتشتمل الخواص الطبيعية للأحجار على الوزن النوعي الظاهري ، المسامية الظاهرية ، الامتصاص ، درجة التشبع ، النفاذية ، والخاصية الشعرية ، الكثافة ، وسيتم توضيحها كالاتي :-

(أ) الوزن النوعي الظاهري Apparent Specific

ويمكن تعيين مقدار الوزن النوعي الظاهري لعينة من الصخر كالآتي:-

١. تجفيف عينة الصخر لمدة ٢٤ ساعة في فرن تبلغ درجة حرارته ١٠٥°م ثم تعيين وزن العينة وليكن W1.

٢. تغمر العينة في الماء لمدة ٤٨ ساعة حتي تتشبع تماما بالماء ثم يعين وزن العينة المشبعة وليكن W2.

٣. توزن العينة المشبعة بالماء وهي مغمورة بكاملها في الماء وليكن الوزن في هذه الحالة W3.

وباستخدام المعادلة الآتية يمكن إيجاد الوزن النوعي الظاهري :-

$$\text{الوزن النوعي الظاهري} = \frac{W1}{W3 - W2}$$

ويفضل أخذ متوسط ثلاث تجارب مختلفة ومن المعادلة السابقة يتضح أن الوزن النوعي الظاهري هو عبارة عن النسبة بين وزن حجم معين من الصخر (حجم المواد الصلبة + الفراغات) ووزن حجم مساوي له من الماء ، والوزن النوعي الحقيقي لعينة من الصخر هو النسبة بين حجم معين من المكونات الصلبة للصخر ووزن مساو له من الماء ويمكن استنتاجه من المعادلة الآتية :-

$$\text{الوزن النوعي الحقيقي} = \frac{W1}{W3 - W2}$$

حيث W3 = وزن الماء اللازم لملء الفراغات .

(ب) الكثافة Density

تم تعريف المواد الصخرية سابقا بأنها مجموع حبيبات المعادن ويضمنها المسامات والشقوق التي تكون معزولة لكنها غالبا ما تكون متصلة مع بعضها البعض ومملوءة بالهواء أو الماء وقد أشير إلي أن حجم الفجوات قد لا يبقي بالضرورة كمية ثابتة ، وتعرف الكثافة بأنها وزن وحدة حجم معين من المادة المعدنية الصلبة ، وتقدر جم/سم^{3} كما توضحها العلاقة التالية :

$$D = \frac{W}{V}$$

حيث أن : D = الكثافة

W = الوزن

V = الحجم

ومن الضروري في حالة المواد الصخرية التمييز بين :

١. كثافة الحبيبات المعدنية الصلبة أو وزن مجاميع المعادن في وحدة حجم من المادة الصلبة .

٢. الكثافة الجافة Dry Density أو وزن مجاميع المعـــادن فـــي وحـــدة من الحجم الكلي أي المادة الصلبة والفجوات عندما تكون الأخيرة خالية من الماء.

٣. الكثافة المشبعة Saturated Density أو وزن مجاميع المعادن وكذلك الماء الموجود في الفجوات في وحدة الحجم أي المادة الصلبة والفجوات عندما تكون الأخيرة مملوءة بالماء .

٤. الكثافة الإجمالية أو الكلية Bulke Density .

أو وزن مجاميع المعادن مع الماء الموجود في الفجوات في وحدة الحجم أي المادة الصلبة والفجوات عندما تكون الأخيرة مملوءة بالماء ، وتعتمد كثافة الحجر بصورة أساسية على المعادن المكونة له وتركيبها الكيميائي والبلـــوري حيث تتغير كثافته بتغير درجة الحرارة والضغط لما تحدثانه من تمدد وإنكماش في الوحدة البنائية ، وليست هناك علاقة بين الكثافة والمسامية وكثافة حبيبـــات المعادن الصلبة والصخر التي تكون فيها كثافة المعادن عالية قد تمتلـــك عـــدد

كبيرا أو قليلا من الفجوات أما قيمة الكثافة الجافة فتعتمد على المسامية وكثافة حبيبات المعادن الصلبة .

وتعد الكثافة أهم الخواص الفيزيائية التي يمكن عن طريقها تحديد درجة كثافة الحجر الأثري ومثيلتها في الحجر المستخدم في أعمال العلاج والصيانة للوصول إلي أفضل درجات التشابه والتطابق بين كليهما لنجاح عمليات الترميم .

وقد ذكر Moen أن الأحجار تعتبر صلدة إذا تراوحت قيمة كثافتها بين ٢,٨-٣,٥ جم/سم٣ وتعتبر ضعيفة إذا قلت عن ٢,٣ جم/سم٣ ، إن احتمال تغير حجم فجوات النموذج خلال فترة التشبع بالماء قد تؤثر على قياسات الكثافة المشبعة لذلك يتوجب عند قياس الكثافة الأجمالية لأية صخرة تسجيل محتوي الرطوبة لها .

(ج) المسامية Porosity

تعرف مسامية المادة الصخرية بأنها نسبة حجم الفراغات إلي الحجم الكلي لمادة الصخر ويعبر عنها بالعلاقة الآتية :

$$N = \frac{V_V}{V}$$

حين أن N = قيمة المسامية

V_V = قيمة حجم الفراغات

V = قيمة الحجم الكلي للمادة الصخرية

ويصبح الصخر أو الحجر مساميا عندما يحتوي على فراغات بين حبيبات المعادن المكونة له وتكون لهذه الفراغات القدرة على احتواء السوائل ، و تختلف قيمة المسامية في الأنواع المختلفة للصخور والأحجار حيث تتوقف على شكل حبيبات المعادن وتدرج حجمها وترتيبها وعلى درجة الأنضغاط والترابط والصلابة وعندما تحوي الصخرة حبيبات مختلفة الحجم فان الأجزاء الدقيقة سوف تشغل الفراغات بين الحبيبات الكبيرة وبذلك تقل المسامية ولذلك فان التوزيع غير المنتظم لحجم الحبيبات يميل إلي إنتاج مسامية أقل من التوزيع المنتظم للحبيبات كما في الصخور النارية وذلك طبقا لحجم حبيباتها وشكلها غير المنتظم وتداخل هذه الحبيبات مع بعضها البعض بما يسمي النمو المتداخل Intergrowth كما أن انخفاض قيمة المسامية في الصخور المتحولة ينتج عن الضغوط الكبيرة التي تعرضت لها هذه الصخور أثناء نشأتها مما أدي إلي تقلص حجم الماء بين هذه الصخور وبالتالي أنخفاض حجم الفراغات البينية أو غلقها، بينما تصل المسامية إلي أعلى قيمة لها في الصخور الرسوبية ويرجع ذلك إلي احتفاظ الحبيبات المكونة لها بأشكالها الكروية أو شبه الكروية مما يسمح بتكوين العديد من الفراغات مختلفة الشكل والحجم طبقا لحجم الحبيبات المكونة للكتلة الصخرية، كما أن الصخور التي تحتوي علي مواد معدنية قابلة للذوبان قد تحتوى علي فجوات وبذلك تكون مساميتها عالية وقد تزداد المسامية لوجود الشقوق الدقيقة والفواصل الأولية ، ويوجد الماء داخل المواد الصخرية أما علي شكل طبقات رقيقة (بسمك الجزئي) داخل الشبكة البلورية للمعادن أو قد يحيط بسطوح الجزيئات أو قد يوجد داخل مسام الصخرة، وأن الماء الذي يتحرك بفعل الجاذبية خلال عملية الضخ يدعى الناتج النوعي Specificyieid أو المسامية الفعالة Effective Porosity وتزداد كميته مع زيادة حجم الحبيبات ودرجة تنسيقها ، أما الجزء الباقي الذي يحيط بالحبيبات فيسمى بالسائل

النوعي المستبقي Specific Retention وتزداد كمية هذا الماء مع نقصان حجم الحبيبات ودرجة التنسيق؛ وتتراوح قيم المسامية في الأحجار الرملية فيما بين ١٢ : ٤٠٪ وتقل في الأحجار الجيرية حتى تصل إلى ٤٪ وتنعدم في الجرانيت.

وتستخدم المعادلة الآتية لتعيين المسامية:-

المسامية الظاهرية $\frac{W1 - W2}{D \times V} \times$ ١٠٠

حيث أن W1 وزن العينة جاف،

W2 وزن العينة بعد الغمر في الماء لمدة ٢٤ ساعة.

V = حجم العينة الكلي.

D = كثافة الماء.

(د) الامتصاص Absorption

عند غمر عينة من الصخر في الماء فأنها لا تمتص منه ذلك القدر الذي يملأ جميع ما يوجد بها من فجوات ويرجع ذلك إلي أن بعض الفجوات التي تحتوي عليها العينة يظل مُحبوسا بها جزء من الهواء وتعرف النسبة المئوية بين حجم الماء الممتص وحجم عينة الصخور بالنسبة المئوية للامتصاص، ويجب ذكر درجة الحرارة ومدى بقاء عينة الصخر مغمورة في الماء عند ذكر نسبة الامتصاص ويمكن التعبير عن نسبة الامتصاص بالمعادلة الآتية:

نسبة الأمتصاص = $\frac{W1 - W2}{W1} \times$ ١٠٠

وتعرف درجة تشبع الماء بأنها النسبة بـين حجـم الفراغـات البينيـة المملوءة بالماء في عينة الصخر وبين الحجم الكلي لهذه الفراغات.

ولكي نجعل الماء يدخل جميع الفجوات المتصلة مع بعضـها الـبعض يجب إخلاء الهواء فيها ويتم ذلك بأن يغمر النموذج في الماء وتركـه يمـتص الماء لفترة كافية بواسطة الخاصية الشعرية Capillary Suction وقد تستعمل طريقة أخرى لدفع الماء داخل المسام تحت تأثير الضغط وأن درجـة الإشـباع يمكن التعرف عليها كذلك كما يلي:

$$\text{درجة الإشباع} = \frac{\text{كمية الماء الممتص خلال الأنغمار البطئ أو تحت الظروف الإعتيادية}}{\text{كمية الماء الممتصة تحت ضغط يعادل ١٥٠ ضغطا جويا}}$$

(هـ) النفاذية أو الخاصة الشعرية Permeability or Capillarity

وتعبر هذه الخاصية عن سهولة مرور الماء وتحركه داخل الصـخور، وتقسم الصخور من حيث مقدرتها على النفاذية إلى:

- صخور منفذة : وتكون الصخور في هذه الحالة ذات مسام أو عديمة المسام ويستطيع الماء في عدم وجود المسام المـرور مـن خـلال الشـقوق أو الفواصل، وكلما زاد حجم المسام والشقوق والفواصل كانت النفاذية عالية كما هو الحال في الحجر الرملي والجيري .
- صخور غير منفذة : وتكون الصخور في هذه الحالة قليلة المسامية أو قـد تحتوي على مسام كثيرة ولكن هذه المسام دقيقة جدا وغيـر متصـلة مـع

بعضها بحيث لا تسمح بنفاذ أو مرور الماء خلالها ، ومن خواص الصخور غير المنفذة عدم احتوائها على فواصل أو شقوق و تعتمد النفانية على كثير من العوامل الهامة مثل مسامية الحجر وحجم حبيباته و السطح النوعي لهذه الحبيبات ودرجة لزوجة السائل أو المحلول ، وتعتبر النفاذية من الخواص الهامة التي يلزم معرفتها بالنسبة للاحجار المشيد منها الأثـر سـواء لمـا تعكسه قيمة هذه الخاصية عن حالة الأثر أو ما تسببه من تلف نـاتج عـن سرعة جريان الماء داخل بنية الحجر الداخلية مما يؤدي إلي تفتيت المـواد الرابطة بين الحبيبات ويؤدي ذلك الفتات إلي اغلاق مسام الحجر والتشققات الصغيرة مما ينشأ عنه بعض الضغوط الداخلية .

وبصورة عامة فإن الصخور ذات المسامية المنخفضة تعتبـر ذات نفانيـة منخفضة أما الأنواع ذات المسامية العالية فإنها تمتاز كذلك بنفانية عالية إلا أن قيم النفانية تختلف طبقا لطبيعة الحجر .

وبالإضافة إلي ما سبق فان تعيين هذه الخاصية تفيد المرمم كثيرا فـي إجراء عمليات التقوية المختلفة سواء بطريقة التسقية أو الحقن العادي أو الحقن تحت ضغط للاحجار الضعيفة أو التي تتطلب حالتها مثل هذه المعالجات .

تأثير الإجهادات علي الصخور

أنواع الإجهادات التى تتعرض لها الصخور القشرة الأرضية:

تتعرض صخور القشرة الأرضية لإجهادات رأسـية وأفقيـة وقاصـة ويرجع السبب فى نشأة هذه الإجهادات الى العوامل الرئيسية الأتية:

١- تأثير الحركات الأرضية العنيفة

٢- القوة الطاردة المركزية لدوران الأرض

٣- عوامل المد والجزر

٤- تأثير قوى الجاذبية الأرضية

٥- تأثير عوامل التأكل والتعرية

٦- التغيرات الطبيعية والكيميائية

٧- الضغط الناتج عن وزن طبقات الغطاء الصخري

عندما تتعرض الصخور لتأثير الأحمال الخارجية المتزنة والتى لا ينتج عنها حركة انتقالية أو دورانية فإنها تعانى تغيرا فى شـكلها الأصـلي أو فـى حجمها أو فى الإثنين معا ويطلق على هذا التغيير "التشوه"

وتعرف الإجهادات بأنها القوة الداخلية المؤثرة على وحدة المساحة فـى نقطة معلومة من مقطع الصخر

وتسلك أغلب أنواع الصخور سلوكا مرنا عندما تتعرض لقدر محـدود من الإجهادات ولكن كثيرا منها يتعرض فى بعض المناطق لإجهادات تزيد عن حدود المرونة بالنسبة لها ولذلك فإنها قد تسلك سلوكا لدنا قبل أن تنهار ويمثـل

(الشكل١٦) منحنى تقريبيا يوضح سلوك الصخور عندما تتعــرض لإجهــادات تزداد تدريجيا من الصفر حتى تصل الى نقطة الإنهيار (التصدع) ويلاحــظ أن الجزء الذى يبدأ من نقطة الأصل "O" وينتهى عند نقطة "X" يسلك فيه الصخر سلوكا مرنا حيث يتناسب التشوه المرن "الإنفعال" تناسبا طرديا مع الإجهــادات التى تؤثر على الصخر وتسمى العلاقة بين الإجهادات والإنفعالات فــى هــذه الحالة علاقة خطية ويعبر عنها بالمعادلة.

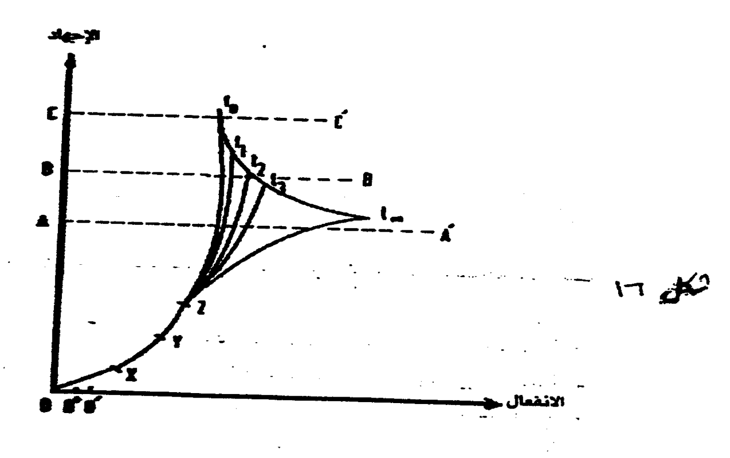
$$\sigma_x = E\ (\varepsilon_x)$$

حيث (σ_x) لإجهاد العمودى فى إتجاه المحور (×)

(E) معامل ينج أو معامل المرونة (×)

(ε_x) مقدار التشوه فى اتجاه المحور

وبالرغم من ان نظرية المرونة تعتبر من أهم الأسس النظريــة التــى تستخدم لتوضيح السلوك الميكانيكى للصخور فإنه ينبغى ملاحظة الشروط التالية اللازم توافرها فى الصخور حتى يمكن تطبيق معادلات المرونة عليها.



شكل ١٦

جدول الإجهادات والتشوهات في الصخور		
سلوك الصخور	↕	↕
السلوك المرن الخطى	OX	الأولى
السلوك المرن المنحنى	XY	
السلوك اللدن	YZ ↕	↕ الزحف الثانوي
السلوك الإنسيابى	ZI∞	↓ الزحف الثلاثي

جدول (١) حدود الإجهادات في الصخور

١- استمرار المادة الصخرية أى عدم وجود تشققات أو فوالق فى الصخور تمنع اتصالها اتصالا مستمرا سواء كانت معرضة للإجهادات أم غير معرضة

٢- ان تكون الصخور أيزوتروبية أى متجانسة ومتماثلة فى خواصها فى الإتجاهات المختلفة

٣- عدم زيادة قيمة الإجهادات المؤثرة على الصخور عن حدود ثوابت المرونة الخاصة بها

ويبدو لأول وهلة أن هذه الشروط تجعل من تطبيق معادلات المرونة على الصخور غير ممكن إلا أن كثيرا من التجارب المعملية التى أجريت على بعض أنواع الصخور القوية مثل الجرانيت أثبتت أنها تخضع لقوانين المرونة وهى واقعة تحت تأثير إجهادات كبيرة نسبيا تصل فى بعض الأحيان الى نقطة

الإنهيار كما أنه يمكن عمليا إهمال الخطأ الناتج من عــدم تجــانس الصــخور وتشابهها فإذا إزدادت الإجهادات عن حد التناسب الخطى نلاحــظ أن المنحنـــى يزداد ميله ولذلك نحتاج الى إجهادات أكبر لنحصل على زيادة فـــى الإنفعـــال ويستمر هذا السلوك فى المنحنى (YX) ويلاحظ أن سلوك الصخور فى هــذه المرحلة سلوك مرن بمعنى أنه إذا زال الإجهاد يزول الإنفعـــال تمامـــا دون أن يترك أى اثر لتغيير يكون قد حدث فى الشكل الأصلىّ للصخور ويطلـــق عـــن النقطة (Y) حد المرونة ويحدث التشوه المرن بصخور القشرة الأرضية نتيجة سريان الموجات الزلزالية ومن البديهى أن مثل هذه الإجهادات اللحظية عاليـــة القيمة لا تسبب نشأة تغييرات أو تراكيب دائمة بالصخور.

فإذا استمرت الزيادة فى الإجهادات عن حد المرونة (Y) فقـــد تســـلك الصخور سلوكا جديدا بين النقطتين (Y,Z) ويتميز هذا السلوك بزيادة التشـــوه كما زاد مقدار الإجهادات وإذا زالت الإجهادات المؤثرة على الصـــخر فإنـــه لا يعود الى شكله الأصلى مرة أخرى أى أنه بعد زوال الإجهادات المؤثرة علـــى الصخر لا يعود المنحنى الى نقطة (O) ولكنه ينتقل الى نقطـــة أخـــرى (Ò) تبعد قليلا عن النقطة (O) على محور التشوهات

وإذا ترك الصخر فترة قد يزول عنه من التغيير الذى طرأ عليه ويبقى جزء أخر به وتوضح النقطة (Ō) على المنحنى مقدار التشوه الدائم أن المتبقى (Residual Strain) الذى يبقى فى الصخر بعد زوال الإجهـــادات المـــؤثرة عليه ويطلق على سلوك الصخر فى هذه المرحلة السلوك اللدن وتنشأ من هـــذا السلوك تراكيب دائمة فى صخور القشرة الأرضية مثـــل الطينـــات وتتعـــرض الطبقات الرسوبية بصفة تكاد تكون دائمة لعمليات الطي بالإضافة الى إنـــزلاق بعض الطبقات الواحدة تلو الأخرى فى بعض الأحيـــان وخاصـــة فـــى حالـــة الصخور التى تسلك سلوكا إنسيابيا قبل ان تنهار.

فإذا إفترضنا أن الصخر قد تعرض لإجهادات أكبر من النقطة (Z) فإنه يمكن ملاحظة أن التشوهات التى تحدث بالصخر ليست دالة للإجهـــادات فقـــط ولكنها دالة للزمن الذى تؤثر فيه هذه الإجهادات.

ويقال للصخور التى يزداد فيها مقدار التشوهات بزيـــادة زمـــن تـــأثير الإجهادات بأنها تسلك سلوكا إنسابيا وتسمى أحيانـــا هـــذه الظـــاهرة " زحـــف الصخور " وأخيرا إذا زاد مقدار تشوه الصخر عن قوة مقاومته الداخلية يـــؤدى الى انهياره (تصدعه) على مستويات يختلف اتجاهها بإختلاف مجال الإجهـــاد المؤثر ويطلق على هذه المستويات مستويات الإنهيار (التصدع) وينشأ عن مثل هذا السلوك الفوالق والفواصل والتشققات بالصخور.

<u>أنواع الإجهادات الأولية فى صخور القشرة الأرضية:</u>

إذا إفترضنا وجود قطعة من صخر مرن على شكل مكعـــب متنـــاهى الصغر على عمق (h) من سطح الأرض (شـــكل ٦٧) ثـــم اتخـــذنا المحـــاور (ox,oy,oz) بحيث تكون نقطة (o) هى أحد أركان المكعب وبحيث يمثل كـــل من (ox.oy) المحورين الأفقيين ويمثل (oz) المحور الرأسى فإذا فرضـــنا أن كثافة الصخر (y) وفرضنا أن مقدار الجاذبية الأرضية منتظم خلال العمق (h) فإن مقدار الإجهادات فى الإتجاه الرأسى (o 2)

— حيث : $yh = o\ 2$ وتدل الإشارة (–) على أن القوة الناتجة مـــن هـــذا الإجهاد تؤثر من أعلى الى أسفل وإذا عوضنا عن المقدار (-h) بالمقـــدار (z) يمكن إعادة كتابة المعادلة كما يلى:

سطح الأرض
h
Z
o
Y
X
o

شكل رقم (٦٧): الإجهادات الأولية فى الصخور.

$$\sigma_2 = Zy$$

ويحدث نتيجة هذا الإجهاد العمودى تشوه (ϵ_2) فى الإتجاه الرأسى فى إتجاه المحور (z) كما يحدث أيضا فى الإتجاه الأفقي (ϵ_x . ϵ_y) أى فى إتجـــاه كل من المحورين (x) (y) وبالمثل يؤدى تأثير كل من الإجهـــادات (σ_y) (σ_x) إلى حدوث تشوهات فى اتجاهات المحاور الثلاثة وبإتباع طريقة جمع التشوهات فى اتجاهات كللا محور على حدة كما هو موضـــح بالجـــدول نحصـــل علـــى المعادلات (١ ، ٢، ٣):

وتمثل μ نسبة بواسان: و (E) معامل المرونة

وبمعرفة مقدار (E_X, E_X, E_Y) يمكن حساب تغير حجم المكعب بعد التشوه فإذا فرضنا أن أبعاد المكعب ١ × ١ × ١ سم فإن مقدار حجم المكعب قبل التشوه × ١ س٣ أى أن $V_o=1Cm^3$

أما أبعاد المكعب بعد التشوه فتصير:

$$(1+\varepsilon_x)_2\ (1+\varepsilon_y)_2\ \ (1+\varepsilon_z)$$

$$V = (1+\varepsilon_x)\ (1+\varepsilon_y)\ (1+\varepsilon_z)$$

$$= 1+\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

مقدار التشوه في أتجاه المحور Y (ε_v)	مقدار التشوه في اتجاه المحور X (ε_v)	مقدار التشوه في اتجاه المحور Z (ε_x)	مقـــــدار الإجهـــــاد العمودي
$\mu = \frac{\sigma y}{E}$ $- \mu = \frac{\sigma_x}{E}$ $- \mu = \frac{\sigma_y}{E}$	$\mu = \frac{\sigma_x}{E}$ $- \mu = \frac{\sigma_x}{E}$ $- \mu = \frac{\sigma_y}{E}$	$\mu = \frac{\sigma_x}{E}$ $- \mu = \frac{\sigma_x}{E}$ $- \mu = \frac{\sigma_y}{E}$	(σ_x) (σ_y) (σ_y)
$E_x = \frac{1}{E}\{\sigma_x - \mu(\sigma_x + \sigma_x)\}$ (3)	$E_x = \frac{1}{E}\{\sigma_v - \mu(\sigma_y + \sigma_x)\}$ (2)	$E_x = \frac{1}{E}\{\sigma_x - \mu(\sigma_x + \sigma_x)\}$ (1)	

(لو حذفت حواصل ضرب التشوهات في بعضها أو المرفوعة إلي الدرجة الثانية نظراً لأنها متناهية في الصغر)

أي إن التغير النسبي في الحجم = $\varepsilon x + \varepsilon y + \varepsilon z$

$$E_x = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma x + \sigma x + \sigma x) \qquad (4)$$

حيث (ε_v) التشوه الحجمي

فإذا فرض أن المكعب الصخري لإجهادات شد فإن قيمة (ϵ_y) التشوه الحجمى لابد وأن يكون موجبا أى انه: $1 - 2\mu \geq 0$

ومن ذلك يمكن أن تستنتج حدود نسبة بواسان فى الصخور

$0 \geq \mu \leq 0.5$

ولكن نظرا لأن المكعب الصخرى المفروض فى كتلة من الصخور ومحاط من جميع الإتجاهات بصخور تقع تحت تأثير إجهاد رأسى مماثل لذلك فإنه يمكـــن اعتبار ان مقدار التشوه الأفقي مساو للصفر وبذلك بمكان إعادة كتابة المعادلـــة (٢) كمايلى:

$$0 = \frac{1}{E} \{\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_x)\} \qquad (5)$$

فإذا فرضنا أن الصخور متماثلة فى الإتجاه الأفقي فإن:

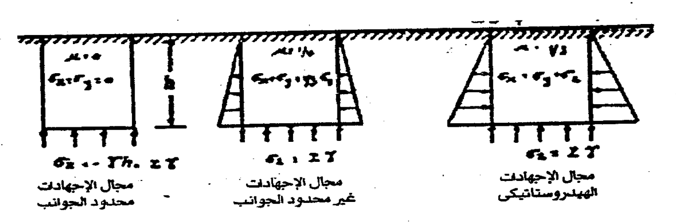
$$\sigma_y = \sigma_x$$

$$\therefore 0 = \frac{1}{E} \{ \sigma_x - \mu (\sigma_x + \sigma_z)\} \qquad (6)$$

ولكن مقدار $\frac{1}{E}$ لا يساوى صفر

$$\therefore \ \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma x \qquad (7)$$

ومن المعادلة رقم (٧) يمكن الحصول على مقدار الإجهادات الأفقية منسوبة الى الإجهاد الرأسى ويمكن تمثيل الإجهادات المختلفة التى تتعرض لهـــا صــــخور القشرة الأرضية كما هو موضح الشكل (٨ ١)



(شكل رقم (٢٨): أنواع الإجهادات فى الصخور

ويمكن تلخيص أنواع الإجهادات التى تتعرض لهــا صـــخور القشــرة الأرضية بأحد حالات أربع وهى:-

الحالة الأولى:

إذا كانت نسبة بو اسان تساوى صفرا 0 = μ فينتج عن ذلك

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 \qquad \sigma_x = \sigma_z$$

ويطلق على هذا النوع مجال الإجهادات أحادى المحور محدود الجوانب

الحالة الثانية:

إذا كانت نسبة بو اسان $\mu = \frac{1}{4}$

فينتج عن ذلك

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{1}{3} \qquad \sigma_z = Z_y$$

ويطلق على هذا النوع مجال الإجهادات غير محدودة الجوانب

الحالة الثالثة:

إذا كانت $\mu = \frac{1}{2}$

فينتج عن ذلك :

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \qquad \sigma_x = Z_y$$

ويطلق على هذا النوع مجال الإجهادات الهيدروستاتيكية

الحالة الرابعة:

استنتجنا فى الأنواع السابقة قيمة الإجهادات الأفقية الناتجة عن الإجهاد الرأسى فقط أة الناتجة عن ثقل الغطاء الصخرى الذى يعلو النقطـــة الموجـــودة

على عمق (h) تحت سطح الأرض وفى كثير من الأحيان تنشأ بصخور القشرة الأرضية إجهادات أفقية نتيجة تأثير الحركات التكتونية أو نتيجة عمليات التحول جانب الإجهادات المتولدة عن ثقل الغطاء الصخرى وفى هذه الحالة تزداد قيمة الإجهادات الأفقية على الأجهادات الرأسية وهذه الحالة هى الأكثر وجودا فـــى صخور القشرة الأرضية.

الخواص الميكانيكية للصخور

خواص القوة:

تتعرض الصخور عادة لثلاثة أنواع من الإجهادات وهى:

١- الإجهادات الناتجة عن الضغط وتؤدى الى إنكماش حجم الصخور التى تتعرض لها.

٢- الإجهادات الناتجة عن الشد وتؤدى الى حدوث تشقق وتصدع فى الصخور التى تتعرض لها.

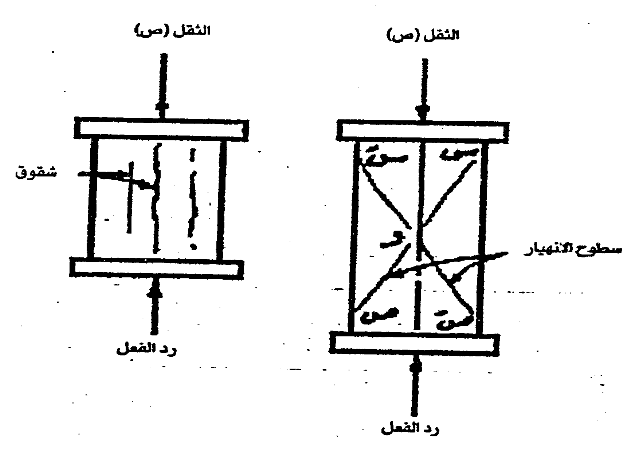
٣- إجهادات القص وهى التى ينتج عنها حركة الصخور حركة نسبية فى الإتجاه تأثير الإجهادات تؤدى الى إنهيار هذه الصخور إذا كانت زوايا احتكاكها الداخلى كبيرة أو تشوهها تشوها لدنا إذا كانت زوايا احتكاكها الداخلى صغيرا.

وتختلف قدرة الصخور على تحمل الإجهادات التى تتعرض لها قبل أن تتصدع فلكل نوع منها قوة تحمل للأنواع المختلفة من الإجهادات ويوضح الجدول (٢) قوة تحمل بعض الأنواع السائدة من الصخور النارية والرسوبية والمتحولة لإجهادات الضغط والشدة.

ويتضح من هذا الجدول أن الصخور تمتاز بوجه عام بقلة تحملها نسبيا للإجهادات الناتجة عن الشد والقص ولذلك فإنه غالبا ما يلجأ المهندسون الى تدعيم الأجزاء التى تتعرض لإجهادات الشد أو القص من المنشأت الصخرية مثل الأنفاق بمواد مناسبة كالخرسانة المسلحة أو الصلب.

(أ) قوة تحمل الصخور لإجهادات الضغط:

تعرف قوة تحمل الصخور لإجهادات الضغط بمقدار الإجهـاد الـلازم لتكسير عينة من الصخر تحت ضغط حمل معين وليست محددة من جوانبها كما هو موضح بالشكل (١٩)



شكل رقم (١٩) : تحمل عينات الصخور لإجهادات الضغط
(إجهاد غير محدود الجوانب)

فإذا فرضنا أن مساحة مقطع العينة = ١٠ سم٢ وكان الحمل الذى ينتج عنه تكسيرها = ٤٠٠ كجم فإن قوة تحمل الصخر لإجهاد الضغط = $\frac{٤٠٠}{١٠}$ = ٤٠٠ كجم/س٢ وتتوقف

قدرة الأنواع المختلفة من الصخور علي تحمل إجهادات الضغط علـــى عدة عوامل أهمها التركيب المعدنى للصخر وخاصة حجم الحبيبـــات المعدنيـــة المكونة للصخر فتزداد قدرة الصخر على تحمل إجهادات الضـــغط إذا كانـــت حبيباتها المعدنية دقيقة الحجم فالأحجار الرملية ذات الحبيبات الدقيقة أكثر قدرة على تحمل إجهادات الضغط من الاحجار الرملية ذات الحبيبات الخشنة وقد تبين من الدراسات الميكروسكوبية لبعض الصخور النارية والمتحولة من الأنواع التى يظهر فيها ترابط قوى بلوراتها المعدنية تكون أكثر تحملا لإجهادات الضغط من تلك التى لا يظهر فيها هذا الترابط.

وبالنسبة للصخور الرسوبية يظهر بوضوح تأثير المادة اللاحمـــة بـــين أجزائها فتزداد قدرتها على تحمل إجهادات الضغط عندما تكون المادة اللاحمـــة من الكوارتز وتقل عندما تكون المادة اللاحمة من الطمى.

جدول (٢)

نوع الصخر	الصخر	قوة تحمل إجهاد الضغط كجم / سم٢	قوة تحمل إجهاد الشد كجم/سم٢	قوة تحمل إجهاد القص/سم٢	زاوية القص	معامل الإحتكاك الداخلي	نسبة بواسان	معامل المرونة كجم/سم٢
نارى	الجرانيت	٢,٥٠٠-١,٠٠٠	٢٥٠-٧٠	٥٠٠-١٤٠	٦٠-٤٥	١,٨-١	٠,٢٥	^{5}١٠-٦-٢
	ديوريت	٣,٠٠٠-١,٨٠٠	٣٠٠-١٥٠	-	-	-	٠,٢٥	^{5}١٠×١٠-٧
	دوليريت	٢,٦٠٠-٢,٠٠٠	٣٥٠-١٥٠	١٠٠-٢٥٠	٦٠-٥٥	١,٨-١,٤	٠,٢٥	^{5}١٠×١١-٨
	جابرو	٣,٠٠٠-١٤٨٠٠	٣٠٠-١٥٠	-	-	-	٠,٢٥	^{5}١٠×١١-٧
	بازلت	٣,٠٠٠-١,٥٠٠	٣٠٠-١٠٠	١٠٠-٢٠٠	٥٥-٥٠	١,٤-١,٠	٠,٢٥	^{5}١٠×١١-٦
رسوبى	حجر رملى	١,٧٠٠-٢٠٠	٢٥٠-٤٠	٤٠٠-٧٠	٥٠-٣٥	١,٢-٠,٧		^{5}١٠×٨-٢/٣
	طين صفحى	١,٠٠٠-١٠٠	١٠٠-٢٠	٣٠٠-٣٠	٥٠-١٥	٠,٦-٠,٢٥		^{5}١٠×٣,٥-١
	حجر جيرى	٢,٥٠٠-٣٠٠	٢٥٠-٣٠	٥٠٠-١٠٠	٥٠-٣٥	١,٢-٠,٠٧		^{5}١٠×٨-١
	دولوميت	٢,٥٠٠-٨٠٠	٢٥٠-٥٠	-	-	-		^{5}١٠×٨,٤-٤
	فحم	٥٠٠-٥٠	٥٠-٢٠	-	-	-		^{5}١٠×٢-١
متحول	كوارتزيت	٣,٠٠٠-٥٠٠	٣٠٠-١٠٠	١٠٠-٢٠٠	٦٠-٥٠	١,٨-١,٢		
	نيس	٢,٠٠٠-٥٠٠	٢٠٠-٥٠	-	-	-		
	رخام	٢,٥٠٠-١,٠٠٠	٢٠٠-٧٠	٣٠٠-١٥٠	٥٠-٣٥	١,٢-٠,٧		
	أردواز	٢,٠٠٠-١,٠٠٠	٢٠٠-٧٠	-	-	-		

كما يؤثر إتجاه الضغط بالنسبة لمستويات التطابق فى الصخور الرسوبية فتزداد شدة تحمل الصخر إذا كان اتجاه إجهاد الضغط عموديا على مستويات التطابق وتقل فى الإتجاهات الأخرى .

كذلك تؤثر درجة تشبع الصخور على شدة تحملها لإجهادات الضغط حيث تقل قوة تحمل الصخور بزيادة درجة التشبع.

(ب) قوة تحمل الصخور لإجهادات الشد:

تعتبر قوة تحمل الصخور الشد ضعيفة جدا إذا ما قورنت بقوة تحملها لإجهادات الضغط فبينما تستطيع بعض أنواع صخور الجرانيت ان تتحمل إجهادات ضغط تزيد عن ٢٠٠٠كجم/سم٢ فإنها تنهار إذا تعرضت لإجهادات شد تقل عن ٧٠كجم/سم٢ – وتقل مقاومة كثير من الصخور الرسوبية لإجهادات الشد فالأحجار الجيرية تبلغ قوة تحملها لإجهادات الشد ٣٥كجم/سم٢ وتتراوح قوة تحمل الأحجار الرملية لإجهادات الشد بين ٧٠-١٤٠ كجم/سم٢

لذلك يراعى عدم استخدام الصخور فى المنشأت التى تتعرض لإجهادات شد كبيرة وينبغى تدعيم المنشأت التى تقام فى الصخور وتتعرض لإجهادات شد كبيرة بدعائم مناسبة لتفادى انهيارها تحت تأثير هذه الإجهادات. ويمكن الربط بين قوة تحمل الصخور لإجهادات الضغط والشد بالعلاقة الأتية:

ج ض = ك × ج ش

ج ض = قدرة تحمل الصخر لإجهادات الضغط

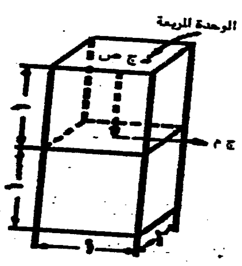
ج ش = قدرة تحمل الصخر لإجهادات الشد

ك = مقدار ثابت تتوقف قيمته على أصل ونوع الصخر وتتراوح بين ٤ إلى ١٠

(جـ) قوة تحمل الصخور لإجهادات القص:

إذا تصورنا مكعبين من الصخر أحداهما موضوع فوق الأخر كما هـو موضح بالشكل(٢٠) فإذا تأثر المكعب العلوى بإجهادين أحدهما عموديـا (ج ص) والثاني مماسى أى قاص (ج م) فإن المكعب العلوى يصبح على وشك الإنزلاق إذا تساوى الإجهاد القاص مع الإجهاد العمودى مضروبا فى معامل الإحتكـاك (ر) أى عندما تكون:

ج م = ج ص × ر



شكل (٢٠)

الإجهادات العمودية والماسة

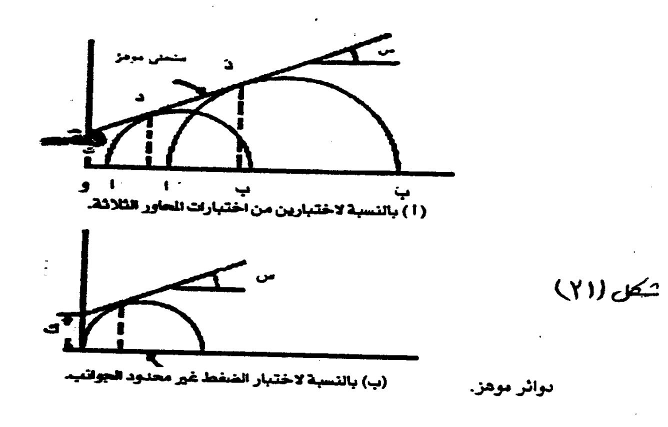
ومما لا شك فيه ان تأثير الإجهادات القاصة فى الصخور لا يكون بمثل هذه السهولة التى تصورنا بها حركة المكعبين السابقين إذا أن معامل الاحتكاك فى هذا المثال يرمز إلى مقدار الإحتكاك بين سطحين متلاصقين أما النسبة لما يحدث فى الصخور فإنه يجب أن نأخذ في الإعتبار كذلك القوة التى تربط بين حبيبات المادة الصخرية ولذلك فإن الإحتكاك الداخلى أو معامل المقاومة للقص ويساوى هذا المعامل ظا س. حيث س = زاوية المقاومة للقص ولقد أمكن نتيجة التجارب التى أجريت على عدد كبير من الصخور إعادة كتابة المعادلة بعد الأخذ فى الإعتبار شدة التماسك بين الحبيبات الصخرية (ك)

ج م = ج ض ظا س + ك

دوائر موهز:

عند تطبيق المعادلة يجب ألا يغيب عن مقدار زاوية المقاومة للقص (س) ومقداره شدة التماسك (ك) ليست ثابته بل تتغير تبعا لتغير إجهاد القص.

ولقد استطاع موهز إيجاد العلاقة بين الإجهادات العمودية والقاصة وزاوية المقاومة للقص وشدة التماسك بواسطة دوائر عرفت باسمه وطريقة رسم هذه الدوائر موضحة بالشكل (٢١)



شكل (٢١) دوائر موهز.

١- ارسم و أ ، و أ على محور الإجهادات العمودية يمثلان وحدات الضغط الجانبى (كجم/سم٢) لإختبارين متتالين على العينة.

٢- ارسم و ب ، ب على محور الإجهادات يمثلان الأحمال المحورية الحرجة الواقعة على العينة (كجم/سم٢) وهذه الإحمال هى اللازمة لتكسير العينة.

٣- ارسم المماس للدائرتين التى تساوى أقطارهما المسافتين أب ، أب على التوالى ليقطع محور الإجهادات القاصة فى نقطة (جـ) ويعرف هذا المماس بمنحنى موهز وذلك لأنه غالبا ما يكون منحنيا ويكون مقدار ميل هذا المماس ممثلا لزاوية المقاومة للقص (س).

والطور (و حـ) ممثلا لشدة التماسك (ك) ويمكن تعيين قيم الإجهادات القاصة بإسقاط أعمدة من نقط تماس منحنى موهز مع الدائرتين المعروفتين بإسم دوائر موهز ونقط التماس فى الشكل ( ) هى د ، د ويمثل طول الأعمدة قيم الإجهادات القاصة.

<u>معامل الأمان:</u>

لكي نضمن سلامة المنشأت الهندسية يجب ألا تتعرض الصخور التى تقام فيها هذه المنشأت لإجهادات تزيد على قوة مقاومتها للأنواع المختلفة للإجهادات كذلك يجب أن نتعرض الصخور او الأحجار المستخدمة فى البناء أو تدعيم المباني لإجهادات تزيد على قوة تحملها بعد ضرب مقدار قوة تحمل الصخور المختلفة فى معامل الأمان.

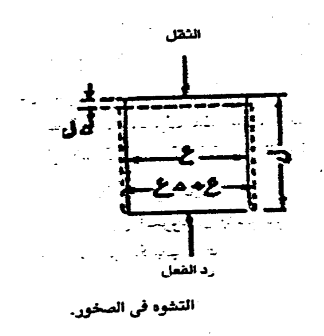
ويتراوح معامل الأمان بين ١ : ٦ أو ١ : ١٠ من قوة تحمل الصخور للإجهادات فى حالة استخدام الصخور فى البناء أما فى حالة استخدامها فى الإساسات فإن هذا المعامل يزداد حتى يصل الى ١ : ٢٠ أو ١ : ٣٠

ويطلق على قوة تحمل الصخور بعد ضربها فـي معامـل الأمـان سـعة الصخور وهى تمثل مقدار الإجهادات المسموح بتعرض الصخور لهـا دون أن تتشقق أو تنهار.

خواص المرونة:

معامل المرونة:

إذا وقع ضغط (ض) على عينة من الصخر يقل عن الضـغط الـلازم لتكسر العينة فإنه يقلل من طولها بمقدار (△ ل) (نفرض أن العينة علـى شكل أسطوانة طولها (ل) وقطرها (ع) وفى نفس الوقت يزيد من قطرهـا ع كما هو موضح بالشكل ( ) فإذا زال تأثير الضغط الواقع علـى العينـة وعادت الى حالتها وشكلها الأصلى تماما قبل تأثير هذا الضغط فإنه يقـال أنها تخضع لقانون هوك الذى يقرر أن مقدار التغير النسبى فى طول العينة "الإنفعال" يتناسب تناسبا طردياً مع الضغط المسبب له ويسمى ثابت التناسب بمعامل المرونة:



شكل رقم (٢٢) التشوه فى الصخور

$$\text{معامل المرونة (E)} = \frac{\text{الإجهاد العمومي (O x)}}{\text{الإنفعال العمودى (Ex)}} = \frac{\text{ض كم / سم٢}}{\frac{\Delta \text{ل}}{\text{ل}}}$$

كذلك أمكن تطبيق قانون هوك على العلاقـة بـين الإجهـاد القـاص (V) والانفعال القاص ($\mathcal{Y}$) .

$$\text{معامل الجمود (G)} = \frac{\text{الإجهاد العمومى (Ї)}}{\text{الإنفعال القاص (} \mathcal{Y} \text{)}} = \frac{Ї}{y}$$

وكذلك أمكن تطبيق قانون هوك على العلاقة بين معـدل التغيـر فـى الإجهادات الهيدروستاتكية ومعدل التغير فى الحجم:

$$\text{معامل بلك (k)} = \frac{\text{معدل التغير فى الإجهادات الهيدروستاتكية (} \acute{s}\,p \text{)}}{\text{معدل التغير الحجمى (E)}}$$

ومن ذلك يمكن استنتاج أن معامل المرونة ومعامل الجمودة ومعامل بلك يعبـر عنها بوحدات إجهاد كجم/سم ولقد أمكن إيجاد العلاقة بين معامل المرونة (E) ومعامل الجمود (G) بالعلاقة:

كما أمكن إيجاد العلاقة بين معامل المرونة والثقل النوعي للصخر :

$$E = 0.9\ (\ P\ -2.1\ )\ \times\ 10^6$$

حيث (P) الثقل النوعي للصخر.

وبالطبع فإن الصخور المرنة غالبا ما تشـابه خواصـها فـى جميـع الإتجاهات " أى أنها تكون أيزوتروبية، ولكن معظم الصخور فى الطبيعة تتغير خواصها المرنة فى الإتجاهات المختلفة ولذلك يتغير معامل المرونة بالنسبة لها من اتجاه لأخر وعلى سبيل المثال يكون مقدار هذا المعامل أصغر ما يمكن فى الاتجاه العمودي على مستوى التطابق ومعنى ذلك أن الصخور يزداد تشـوهها إذا تعرضت لإجهادات عمودية على مستويات التطابق.

وبصفة عامة يمكن القول: إن قيمة معامل المرونة تزداد بإزديـاد قـوة مقاومة الصخور لإجهادات الضغط.

<u>نسبة بواسان:</u>

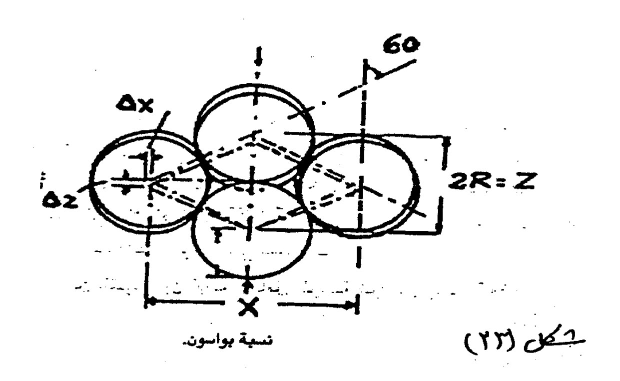
تعرف نسبة بوسان بأنها بين مقدار الانفعال الجانبى ومقدار الطولى فإذا فرضنا أن عينة صخرية أسطوانية الشكل طولها (ل) وقطرها (ع) كالموضحة بالشكل ( ) تعرضت لإجهادات لا تزيد عن حد المرونـة بالنسـبة للصـخرة وأحدثت تشوها (انفعالا) مقداره (△ ل) فى الإتجاه الطـولي (△ ع) فـى الإتجاه العرضى من نسبة بواسان:

$$\text{نسبة بواسان} = \frac{\frac{\Delta ع}{ع}}{\frac{\Delta ل}{ل}}$$

أى النسبة بين التشوه والمستعرض والتشوه الطولى

ولقد أمكن إيجاد مقدار نسبة بواسان لحالة افتراضية لشـكل الحبيبـات المعدنية المكونة للصخر كما يلى:

نفرض أن الحبيبات المعدنية على شكل كرات ومرتبة على شكل معين تمس كل حبيبة مجاورتها فى إثنى عشر نقطة كما هو موضح بالشكل (٢٣)



نسبة بواسون.

شكل (٢٣)

وسبق استنتاج الحدود التي تتغير فيها قيمة نسبة بواسون فى صخور القشرة الأرضية المعادلة (٤) وهى كما يأتي:

$0 \geq \mu \leq 0.5$

وبالرغم من أن نسبة بواسون ومعامل المرونة يطلق عليها ثوابت عليهما ثوابت المرونة إلا أن قيمهم فى الحقيقة ليست ثابته إذ أنها تعتمد على طبيعة المنحنى الذى يمثل العلاقة بين الإجهاد والانفعال وعلى الظروف التي أجريت فيها التجارب اللازمة لتعيين قيمة هذين المعاملين.

وترتبط ثوابت المرونة وهى:

(E) معامل المرونة

(G) معامل الجمودة

(μ) نسبة بواسان

(K) معامل بلك

( ) ثابت لامية

بعلاقات رياضية بحيث يمكن التعبير عنة أى واحد منها بدلالة اثنين من الثوابت الأخرى كما يتضح ذلك من المعادلة الآتية:

$$\mu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} = \frac{3K - 2G}{6K+2G} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (\ )$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (\ )$$

$$K = \frac{E}{2(1+\mu)} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (\ )$$

ولذلك يكفى بالنسبة للصخور المرونة تعيين معامــل المرونـــة ونســبة بواسون

خواص اللدونة:

يمكن تقسيم خواص اللدونة بالنسبة للصخور بملاحظة مقدار تشــوهها بالنسبة لزيادة زمن تعرضها للإجتهادات الثابته.

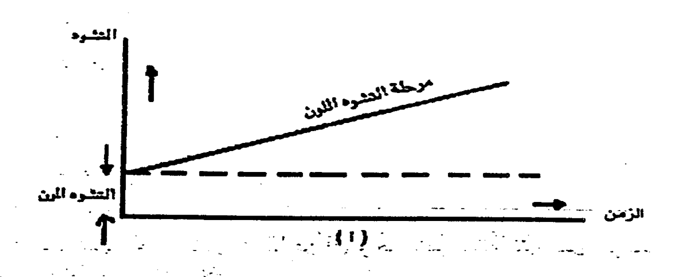
ولقد أمكن تمثيل هذه العلاقة بواسطة منحنيات موضحة بالشــكل (٢٤) يطلق عليها منحنيات الزحف فى الصخور.

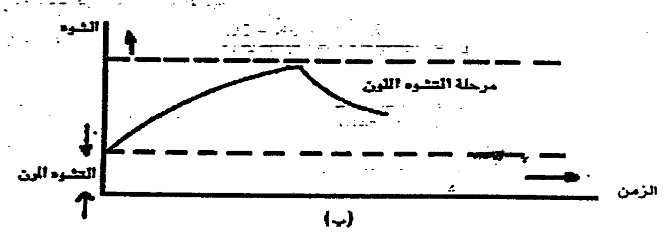
التراكيب الثانوية فى الصخور:

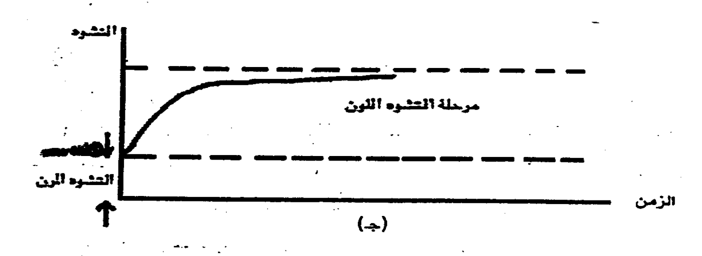
يمكن تقسيم صخور القشرة الأرضية بالنسبة لما ينشأ فيها من تراكيــب ثانوية الى ثلاثة مناطق رئيسية:

١- منطقة الكسر :

وهى قريبة من سطح الأرض ويمكن تمثيلها بالإجهادات لحادية المحور "الإجهاد غير محدد الجوانب"







شكل رقم (٢٤): منحنيات الزحف فى الصخور

(أ) الزحف الثانوى (ماكسيول)

(ب) الزحف الثلاثى (كلفن)

(جـ) الزحف الأولى (بنجهام)

٢- منطقة الطي:

وتوجد فى أعماق متوسطة من سطح الأرض ويمكن تمثيلها بالإجهادات ثنائية المحور "الإجهاد محدود الجوانب"

٣- منطقة الأنسياب:

وتوجد على أعماق كبيرة من سطح ويمكن تمثيلها بالإجهادات ثلاثية المحور وعند تساوى قيمة هذه الإجهادات فى اتجاه المحاور الثلاثة تعرف بحالة الإجهاد الهيدروستاتيكي

التشقق فى الصخور:

يمكن تعرف الشقوق فى الصخور بأنها أى كسر فى كتلة الصخور وتنشأ الشقوق أو الكسور عادة بالصخور نتيجة تعرضها لإجهادات تزيد على قوة تحملها.

وعندما تتكون بالصخور سلسلة من الشقوق المتصلة ذات أشكال محددة لها علاقة ببعضها فإنها تسمى بالفواصل (Joints)

أما إذا تحركت كتلتا الصخور على جانبي الكسر حركة نسبية فى الإتجاه الرأسى أو الأفقي أو الإثنين معا فإن الكسر يعرف بالفالق أو الصدع (Fault) وقد تكون هذه الحركة النسبية صغيرة جدا بحيث لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة وقد تكون كبيرة جدا تبلغ عدة كيلومترات.

وعندما توجد مجموعة من الفوالق فى منطقة معينة فإنها تعرف بأسم منطقة الفالق أو القص (Shear Fault Zone)

وتعتبر إجهادات الشد من اهم العوامل المسببة للفوالق والفواصل فى الصخر وتنشأ هذه الإجهادات غالبا فى الصخور نتيجة الإنخفاض فى درجة

الحرارة أو تبخر جزء من المياه التى تحتوى عليها الصخور أو بسبب تأثير هاذين العاملين معا وقد يحدث الانكماش في الصخور الذى يسبب تولد الإجهادات نتيجة إعادة تبلور بعض المواد الغروية التى تحتوى عليها بعض الصخور اللينة أو التربة.

ومن أمثلة هذه الأنواع من الشقوق تلك التى توجد فى صخور البازلت فنلاحظ أن هذه الشقوق تأخذ أشكالا سداسية منتظمة أما فى حالة الطين فإن الانكماش يحدث نتيجة جفاف الطين ولذلك فإن الشقوق فى هذه الحالة تكون غير منتظمة وذلك لعدم انتظام مقدار التبخر فى جميع الأجزاء وذلك كما هو موضح بالشكل.

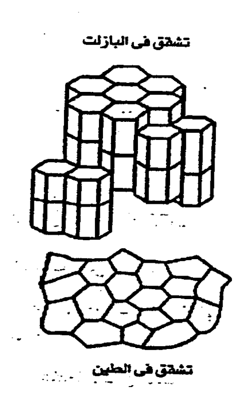
الفواصل:

يبدو لأول وهلة أن الفواصل فى الصخور تأخذ أشكالا عشوائية ولكن الفحص الدقيق للفواصل أثبتت أن اتجاهات الفواصل لها علاقة محدودة مع مستويات التطابق أو خطوط انسياب الصخر أثناء تكوينه.

وتحدد خطوط الإنسياب فى الصخور بإتجاه البلورات حيث نجد أن المحار الطويلة لمعظم البلورات متوازنة وتشير الى اتجاه خطوط الإنسياب.

ويوجد بالصخور الرسوبية عادة نوعان من الفواصل متعامدة على مستوى التطابق ويطلق عليها فواصل مضربية أو فواصل ميلية تبعا لاتجاهها بالنسبة لاتجاه مستوى التطابق.

أما فى الصخور النارية فتوجد ثلاثة أنواع من الفواصل منا هو موضح بالشكل



شكل رقم (٢٥)

التشققات فى الصخور

الأول وتكون موازية تقريبا لخطوط انسياب الصخر (Flat Lying Jonts)
والثانية وتسمى الفواصل الطولية (Longitudinal Joints)

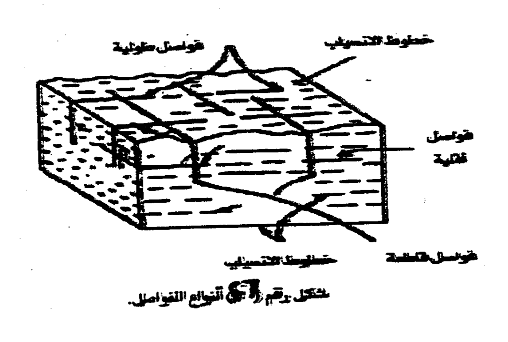
أنواع الفواصل:

تنشأ الفواصل بالصخور نتيجة تعرضها للإجهادات وتنقسم الفواصل تبعا لنوع الإجهادات المسببة لها الى قسمين.

١- فواصل ناتجة عن إجهادات الشد أو الضغط.

٢- فواصل ناتجة عن إجهادات القصور

ويتميز النوع الأول من الفواصل بحركة الحوائط على جانبى الشـــقوق بعيدا عن بعضها وقد تمتد هذه الفواصل وتتسع وتزداد حركة الكتل الصـــخرية مما يؤدى فى نهاية الأمر الى تكوين الفوالق أما فى النوع الثاني من الفواصـــل فإن حركة الحوائط على جانبى الشق تكاد تكون موازية لنفس اتجاه الشق، كما أنه لا ينتج عن هذا النوع من الفواصل حركات للكتل الصخرية المتعامدة على اتجاه الشقوق.



شكل رقم ( ) أنواع الفواصل.

الفوالق (Faults)

تختلف طبيعة الشقوق التى تنشأ بالصخور قبل تصــدعها أو إنهيارهــا بإختلاف نوع هذه الصخور ومقدار واتجاه الإجهادات التى تتعرض لهــا وقــد يحدث التشقق فى الصخور على طول مستوى يعرف بمستوى الفالق وتســمى كتل الصخور المجاورة لهذا المستوى بحوائط الفالق أما كتلة الصخور التى تقع أعلى هذا المستوى فتسمى بالحائط العلوى وتسمى الكتلة الصخرية التــى تقــع أسفل مستوى الفالق بالحائط السفلى.وتوجد أنواع مختلفة من الفوالق منها الفالق العادى وفيه يتحرك الحائط العلوى إلى أسفل كما هو موضــح بالشــكل (٦٢) ومنها الفالق المعكوس وفيه يتحرك الحائط العلوى إلى أعلى.

وفى الحالتين يحدث التشقق على طول سطح الفوالق نتيجة للإجهــادات القاصة وقد يحدث ان تبتعد حوائط الفوالق بعضها عن بعض فينتج عــن ذلــك وجود منطقة تصدع (Fault Zone) يختلف عرضها من ٣-١٠ أمتار أو أكثر وحدوث إزاحة الكتل الصخرية.

طرق التعرف على الفوالق:

من أهم الظواهر التى تساعد على التعرف على الفوالق ما يأتي:

١- عدم إستمرار التراكيب الجيولوجية ويمكن التعرف عليه إمــا بفحــص سطح الأرض إذا كانت مكاشف الطبقات واضحة على ســطح الأرض وإما بحفر أبار اختبارية لكشف الطبقات السفلية.

٢- تكرار ظهور أو اختفاء بعض الطبقات

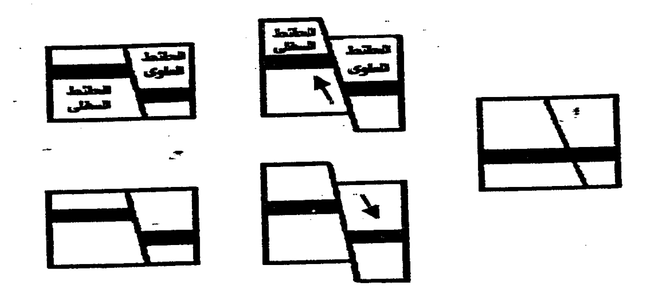
٣- وجود العلامات المميزة الأتية بمستوياتها الفالق وهى.

أ- تفتت أو استدارة الصخور أو طحنها.

ب-وجود حزوز بسطح الصخور مصحوبة بخدوش نتيجة للإحتكاك

ج- سحق الصخور بالمنطقة ليصبح على شكل عجينة فى مظهره

د- إمتلاء شقوق الفالق بالسيليكا أو المعادن



شكل رقم (٣-٦) حركة الحائط على جانبى الفوالق

تعيين اتجاه حركة الفالق:

بالرغم من انه يمكن تمييز مقدار الإزاحة التى حدثت فى الطبقات على جانبى الفالق إلا أنه يصعب عادة تحديد الإتجاه الذى تحركت فيه الطبقات.

ولتحديد هذا الإتجاه أهمية كبيرة من الوجهة الهندسية يوضحها المثال التالي : قد تحتوى بعض الصخور الرسوبية على طبقة من الرمال المسامية التي تظهر فى موقع يراد بناء احد السدود فيه.

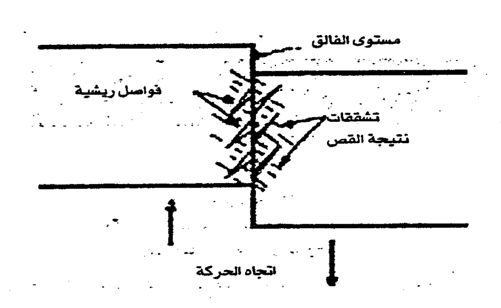
ففي مثل هذه الحالة ينبغي – فى حالة وجود فالق يقطع هذه الطبقة – معرفة ما إذا كان قد تسبب فى خفض بقية هذه الطبقة المسامية وبالتالى فإنه من المتوقع وجودها على عمق ما ام أن الفالق قد تسبب فى رفع بقية الطبقة ثم تأكلت ونقلت بعد بعوامل التجربة والتعرية.

كذلك قد تسبب الفوالق فى إدخال بعض الصخور اللينة تحت المواقع المراد إقامة المنشأت الهندسية عليها على حين لا يظهر فحص الصخور على سطح أى أثر للفوالق.

ومن أبسط الطرق المتبعة لمعرفة اتجاه حركة الفالق هو تحريك اليد برفق فوق سطح الفالق فإذا كان ملمس الصخر خشنا دل ذلك على أن الصخر الذى يقع تحت اليد قد تحرك فى نفس اتجاه حركة اليد أما إذا كان الملمس ناعما فإن ذلك يدل على أن كتلة الصخور قد تحركت فى عكس اتجاه حركة اليد ومن الطبيعي أنه لا يمكن الاعتماد على هذه الطريقة اعتمادا كبيرا إذ إن عوامل التجربة قد تكون هى التى أثرت على سطح الصخور فجعلتها ملساء أو خشنة فى جميع الاتجاهات.

وهناك طريقة أخرى يمكن بواسطتها الاستدلال على الإتجاه حركة الفوالق وهى فحص الفواصل التى تتكون نتيجة الشد فى السطح الذى تحركت

فيه إحدى كتل الصخور بالنسبة للكتلة الأخرى ويؤكد وجوده الزوايا الحادة بين تلك الفواصل وبين سطح الفالق أن كتلة الصخر التى توجد بها هذه الفواصل قد تحركت فى اتجاه رأسى على الزاوية الحادة ويتضح ذلك فى الشكل (٢٧)



شكل رقم (٢٧) الفواصل الريشية

الطيات (Folds)

تنشأ الطيات فى الصخور نتيجة تأثير الإجهادات العمودية والقاصة ويمكن تقسيم الطيات تبعا للأسباب الميكانيكية المكونة الى أربعة أقسام وهى:

١- طيات تنشأ بالثنى

٢- طيات تنشأ بالإنسياب

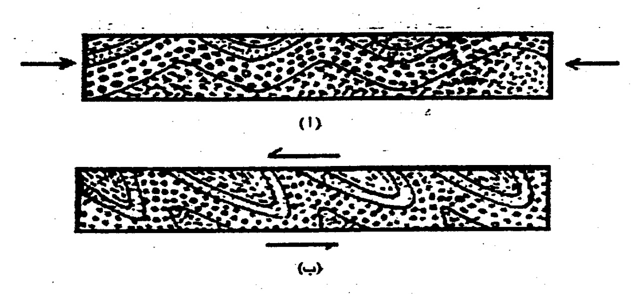
٣- طيات تنشأ بالقص

٤- طيات تنشأ نتيجة للإجهادات الرأسية

١ - الطى بالثنى

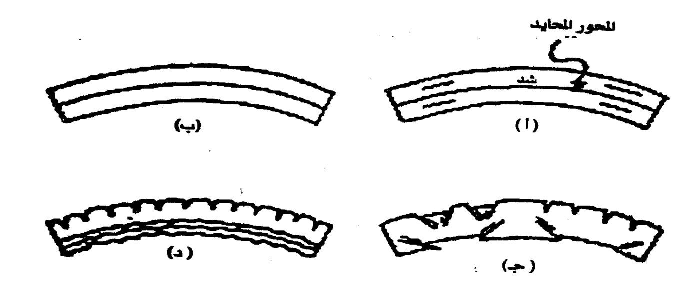
وينسا هذا النوع من الطيات نتيجة تأثير الضغوط الأفقية أو الإجهادات ويوضح شكل (٢٨أ) سلوك طبقات أفقية تعرضت لضغوط أفقية وعند انثناء طبقات من صخور متجانسة كما فى شكل (٢٨ب) فإن الجزء العلوى المحدب من الطبقة يتعرض لقوى الشد بينما يتعرض الجزء السفلي لقوى الضغط أما الجزء الذى يقع فى المنطقة المتوسطة فإنه لا يتأثر باى نوع من القوى ويسمى بالمحور المحايد.

وإذا كانت الصخور تسلك سلوكا لدنا فإن الجزء العلوى يصبح أكثر استطالة وأصغر سمكا بينما يصير الجزء السفلى أقل استطالة وأكثر سمكا كما هو موضح بالشكل (٢٨) أما إذا كانت الصخور هشة فإنها تتصدع كما هو موضح بالشكل (٢٨) وعلى السطح العلوى المحدب تتكون كسور تنشأ من إجهادات الشد أو فوالق عادية صغيرة بينما تتكون على السطح السفلى المقعر فوالق معكوسة صغيرة وقد تتجعد الصخور على السطح السفلى كما هو موضح بالشكل (٢٨)

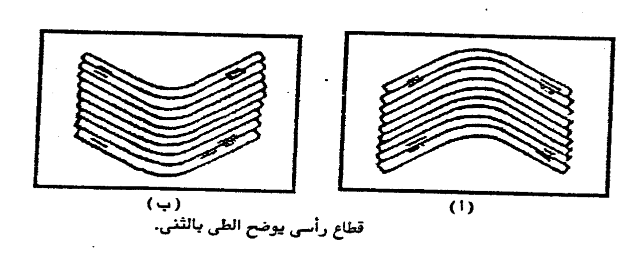


(أ) طيات ناتجة عن ضغوط أفقية.
(ب) طيات ناتجة عن ضغوط القص.

شكل رقم (٢٨)



شكل رقم (٢٩) الطى بالثني



قطاع رأسي يوضح الطى بالثنى.

شكل رقم (٣٠) : قطاع رأسى يوضح الطى بالثنى

وتتميز الصخور الرسوبية بوجود مستويات للتطابق ويمكن تشبيه عملية طي الطبقات بإنثناء مجموعة سميكة من الورق. إن أهم عوامل الطي هو إنزلاق الطبقات الواحدة وراء الأخرى كما هو موضح بالشكل (٣٠) وهذه الظاهرة ذات أهمية كبيرة لتفسير بعض أنواع الطيات الأنزلاقية وبعض أنواع التشققات فى الصخور

ويؤدى الطى بالثنى فى الصخور الرسوبية الى تقوس الطبقات القوية تحت تأثير القوة الضغطية بينما تنساب الطبقات الضعفية لتنزلق الواحدة وراء الأخرى

٢- الطيات الانسيابية:

ينشأ الطي الانسيابي فى حالة وجود صخور لدنة تعرضت لإجهادات كبيرة وقد يؤدى الإرتفاع الكبير فى درجة حرارة الصخور أو وجودها محاطة بضغوط كبيرة الى سلوكها سلوكا لدنا يشبه بوجه عام سلوك السوائل غليظة القوام.

ويحدث الطي الإنسيابي عادة التى توجد بها الحركات البنائية للجبال حيث أن المناطق المتوسطة من الأحواض الترسيبية العظيمة التى تسمى جيوسينكلين (Geosynclines) تتجمع بها طبقات رقيقة من صخور ضعيفة كالطين الصفحى والصلصال والمال وهذه التكاوين الضعيفة تتسلك سلوكا لدنا وتنساب بسهولة نظرا لتأثير الضغوط الشديدة والحرارة المرتفعة والمحاليل النشطة.

وجدير بالذكر أن الطي الإنسيابى يشبه فى مظهره الطى بالثنى ولكنه يتميز بوجود طيات منزلقة صغيرة الحجم على نطاق كبير.

الطي بالقص:

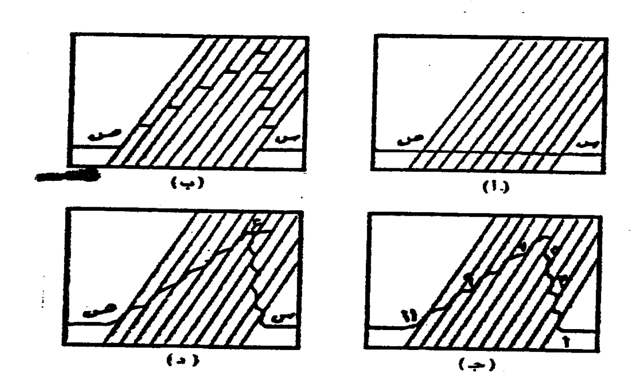
ويسمى أحيانا بالطى الإنفصامى ويرتبط ارتباطا وثيقا بالطى الإنسيابى وينشأ نتيجة إزاحات تفاضلية دقيقة جدا على طول شقوق أو فواصـــل يتقـــارب بعضها من بعض.

ويتضح من الشكل (٣١) أن كتلتى الصخر رقـــم (ا) تبقيـــان فـــى مكانهما وتزاح الكتلة رقم (ب) الى أعلى لأكبر مسافة بين الكتل الواقعة علـــى الجانبين والتى تتحرك تدريجيا لمسافات أقل

وإذا كانت الكسور قريبة جدا من بعضها والمسافات بينهما أقـــل مـــن سنتيمتر فإننا نجد أن الطبقات نتيجة للإحتكاك الشديد تصبح موازية الكسور كما هو موضح بالشكل (حـ) ويمكن التركيب الناتج عبـــارة عـــن طيـــه كبيـــرة مصحوبة بطيات صغيرة كما هو موضح بالشكل (ء)

وفى الحالات البسيطة يكون الطى الإنفصامى مصحوبا دائما بالكسور والفواصل والتشققات غير أن هذه الكسور قد تختفي أو تتلاشى نتيجة إدماجها وتلاحمهـــا بفضل إعادة تبلور الصخور.

ومن الواضح أن الطي الإنفصامى قد يقلل كثيرا من سمك الطبقات ولا يزيد سمكها على الإطلاق ويتضح ذلك من شكل (أ) حيث يظهـــر أن طـــول الطبقة الأصلى (س ص) قد أصبح بعد عملية الطى الإنفصـــامى (س ع ص) وتحت ظروف التشوه الشديد للصخور فإن المرحلة الأولى قد تؤدى الى الطـــي بالثني أو الطي الإنسيابى ويعقب ذلك نشأة كسور يتقارب نم بعضـــها الـــبعض وهذه تؤدى بالتالى الى الطي بالقص.



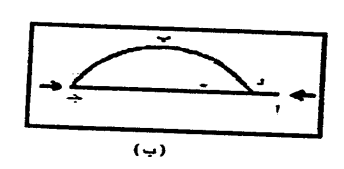
شكل رقم (٢١)قطاع رأسى يوضح الطى بالقص

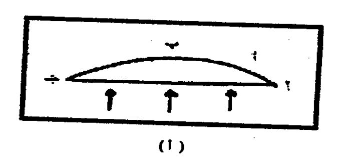
٤- الطي نتيجة الإجهادات الرأسية:

تؤدى أحيانا الإجهادات التى تؤثر علـــى الصـــخور دون أن يصـــحبها تشققات أو كسور إلى نشأة الطيات بها.

وقد يرجع السبب فى نشأة الإجهادات الرأسية بالصخور الى تدخل كتلة نارية شكل لاكوليث أو إرتفاع أنبوبة محلية الى أعلى.

ففى شكل (أ) يظهر الطول الأصلى (أ) ثم تقوس على شـــكل قبـــة نتيجة تعرض الطبقة لإجهادات رأسية فإحتفظت (أ)بمكانتهما ثم أخذت الطبقة شكل قبة (أ) أى أن الطبقات تتعرض فى هذه الحالة سطحها العلوى مكونة قبة أو طية محدبة دون أن تتحرك نهايتها الطبقة من مكانهما الأصلى.





شكل رقم (٣٢) طية ناتجة بالحركات الرأسية

(أ) رفع الغطاء نتيجة تداخل كتلة على شكل قبة

(ب) طية ناتجة بالثني

الأهمية الهندسية للفوالق والطيات

يهتم المهندسون بالفوالق اهتماما كبيرا لان وجودها فى منطقة تقام عليها المبانى أو تنشأ بها الأساسات يؤدى الى اتخاذ إحتياطات كبيرة وبالتالى نفقــات باهظة فى تكاليف الحفر والأساسات وأعمال الخرسانة وغير ذلك من أعمـــال الإنشاء.

ومن اهم أثار الفوالق وأكثرها خطرا على المبانى هى المواد الناعمــة التى تخلفها فى منطقة الفالق فوجود هذه المواد يقلل مـــن مقاومـــة الصـــخور للإجهادات مما يعرض المنشأت المقامة عليها للآثار.

أما من ناحية الطيات فإن الطيات المقعرة تعتبر من أكثر أنواع التراكيب قدرة على تجميع المياه الأرضية بها مما يسبب بالتالى مشكلات مائية خطيــرة عند إنشاء المبانى أو الأنفاق فى المناطق التى توجد بها مثل هذه الطيات.

ومن ذلك يتضح ان اختيار مواقع اللمنشأت الهندسية المختلفة يؤثر فيــه الى حد كبير وجود الفوالق والطيات بالمنطقة لذلك ينبغى قبل اختيار موقــع أى منشأة هندسية الإهتمام بدراسة التراكيب الجيولوجية بالصخور الموجـــودة فـــى الموقع المزمع إقامة هذه المنشأت عليها وتحديد ما قد يوجد به مـــن فوالـــق أو فواصل أو طيات.

الصـــلادة : Hardness

تعني الصلادة بالنسبة للمواد الصلدة مجموعة من الأشــياء فقــد تعبــر الصلادة عن قدرة المادة علي مقاومة الخدش Scratching أو القطع Cutting أو التآكل بالإحتكـــاك Abrasive أو عمـــل علامـــة لدنـــة بهـــا Plastic Indentation ، وتختلف قيمة هذه الخاصية في الصخور اختلافا بينيـــا حيـــث تتأثر ببعض الخواص الأخري كالتماسك Cohesion والهشاشـــية Brittlness وقوة التحمل للأجهادات المختلفة مثل الضغط والشـــد وكـــذلك حـــد المرونـــة Elastic Limit ونقطة الخضوع Yield Point ويجب عند اجراء اختبـــارات الصلادة ملاحظة تغير الصلادة الدقيقة Micro Hardness في حالة الصخور ، وذلك عند الانتقال من معدن لاخر من المعادن المكونة للصخور الناريـــة أو المتحولة وكذلك من حبيبات المعدن إلي المواد الرابطة في الصخور الرســـوبية لتجنب الخطأ في تقدير هذه القيمة ، وتوجد الكثير من الأجهزة العلمية للقيـــاس الكمي الدقيق للصلادة وكذلك لقياسها في المساحات الصغيرة أو في الاتجاهـــات المختلفة ويعتبر العالم النمساوي مو Moh هو أول من اقترح مقياسا للصـــلادة عبارة عن عشرة معادن مختلفة اعطي لكل منها رقما قياسيا واســـتخدمت هـــذه المعادن كمقياس سمي بأسمه Moh's scale مقارنة بقيمة الصـــلادة المقـــدرة معمليا بواسطة مقياس فيكرز للصلابة (Vickers (HV .

جدول يوضـــح قـــيم الصـــلادة لـــبعض المعـــادن بواســـطة مقيـــاس MOH'S SCALE مع مقارنتها بمواد أخري عينت بمقياس فيكرز .

مقياس MOH		مواد أخري	
تلك	١	الجرافيت	٠,٧
الجبس	٢	اسفلت	١,٣
الكالسيت	٣	ظفر الأصبع	١,٥
الفلوريت	٤	ملح الطعام	٢,٠
الأباتيت	٥	الألومنيوم	٢,٦
فلسبار	٦	النحاس	٢,٨
الكوارتز	٧	النحاس الأصفر	٣,٥
التوباز	٨	نصل السكين	٥,٤
الكوراندم	٩	المبرد	٦,٢
الماس	١٠	الزجاج	٦,٥

هـ- المواد الرابطة Binding Materials

لا توجد المواد الرابطة في الصخور النارية بصفة عامة ، وقد توجد في بعض أنواع الصخور المتحولة مثل الكوارتزيت ، في حين أن هذه المواد تظهر بوضوح في الصخور الرسوبية ، و أهم ما يقابل الأحجار من مشـاكل متعلقـة

بهذه الخاصية في الأحجار هي الضغوط الناتجة عن الأحمال العمودية ويرجع ذلك لعدم توزيع هذه الأحمال بصورة متساوية، علي سطح الحبيبات المكونة للأحجار والتي تكون في العادة ملتصقة مع بعضها في أجزاء محدودة من المساحة السطحية الكلية مما ينتج عنه اجهادات في نقط الالتحام أعلى من الاجهادات المتوقعة في كل أجزاء الحبيبات تكون نتيجتها حدوث ما يسمي بالانسياب أو الزحف كنوع من الانفعالات التي تصاحب الاجهادات الواقعة على نقط التحام الحبيبات ببعضها .

كما انه في حالة وجود نسبة بسيطة منها فان عملية الغسل والنزح لهذه المواد تؤدي إلي نتائج غير مأمونة بالنسبة لسلامة الحجر ، كما أن تقدير كميتها ونوعيتها هام جدا لمعرفة درجة تماسك الحجر ، هذا إلي جانب أن عملية غسل ونزح المواد الرابطة وترسيب بعضها خاصة الأكاسيد المعدنية على سطح الحجر يؤدي إلي تكوين ما يسمي بالقشرة الصلدة Hard Crust وغالبا ما تكون مكونات الحجر خلفها ضعيفة لا تتحمل تأثير المتغيرات الجوية ، كما أن هجرة المواد الرابطة الحديدية تؤدي إلي تشويه سطح الأثر في بعض الحالات مؤدية إلي ما يعرف بمرض الحجر Stone disease.

Thermal Properties الخواص الحرارية

(أ) التوصيل والانتقال الحراري :

ويعرف التوصيل الحراري بأنه قدرة المادة على توصيل الحرارة من جزء لأخر ويتعمد على التركيب البنائي الداخلي للمادة وكثافتها ومحتوي الرطوبة ودرجة حرارة الوسط ويتم خلال ثانية واحدة لمادة سمكها ١ سم عند درجة حرارة قدرها ١°م عبر نهايتها المعاكسة وتقدر بالسعر الحراري /سم.ث.م°.

(Cal/Cm.Sec.Deg.)

ويمكن حساب معامل التوصيل الحراري من خلال الصيغة التالية :-

$$K = \frac{Q_a}{A(T1 - T2)_2}$$

حيث أن K = معامل التوصيل الحراري

Q = كمية الحرارة المارة خلال البلاطة المختبرة (al)

a = سمك البلاطة الحجرية Cm

A = مساحة سطح البلاطة المختبرة Cm^2

(T1–T2) = فرق درجات الحرارة بين طرفي البلاطة (م°).

2 = الوقت المستغرق لمرور الحرارة خلال البلاطة (ث).

أما الانتقال الحراري Transition Of Heat فتنتقل الحرارة من السطح إلي البيئة والعكس وذلك بميكانيكيتين هما الحمل الحراري Convection والإشعاع Radiation فالحمل الحراري تنتقل الحرارة من خلاله بواسطة الهواء الذي يتحرك على طول سطح التركيب ويعتمد علي سرعة الهواء أما الإشعاع : فتعتبر عملية انتقال الحرارة به عملية معقدة جدا ، وتعتبر الأحجار من المواد رديئة التوصيل الحراري إلا أن طول فترة التعرض لأشعة الشمس نهارا تسمح بتخلل الحرارة ببطء كما تفقد هذه الحرارة المختزلة ليلا عند انقطاع المصدر الحراري وبصفة عامة تتناسب هذه الخاصية طرديا مع كثافة الحجر وعكسيا مع المسامية الظاهرية .

(ب) التمدد الحراري Thermal Expansion

وهي من الخواص الهامة للأحجار والتي يعزو اليها عمليات تلف الأحجار وتقشرها وانفصال حبيباتها وطبقاتها نتيجة تعرضها للمصادر الحرارية سواء من المصادر الحرارية الطبيعية (أشعة الشمس) أو الصناعية حيث يؤدي تعرض الأحجار لدورات متكررة من الحرارة والبرودة إلي حدوث تمدد للحجر في حالة تعرضه للحرارة وانكماشة نتيجة تعرضة للبرودة وذلك أثناء تعاقب الليل والنهار حيث تؤدي عمليات التمدد والانكماش إلي تهشم المعادن خاصة انهيار المناطق الضعيفة الموجودة في المعادن كمستويات تشقق ولا تعود الأحجار إلي حجمها الأصلي بعد التبريد وتتراوح الزيادة في الحجم بعد التبريد بين ٠,٠٢٪ إلي ٠,٤٥٪ حيث يختلف معامل التمدد من حجر إلي أخر مما ينتج عنه ضغوط تصل إلي الحد الأقصى لها مع معدن الكوارتز .

(ج) مقاومة الحريق Fire – Resistance

وهي خاصية تعبر عن محافظة المادة على قوتها ومتانتها لفترة معينـــة من الزمن عندما تتعرض للهب مباشر وتقاس هذه الخاصية بعد ساعات الثبـــات للمادة المعرضة للهب وتعتبر الأحجار من المواد ذات المقاومة الضعيفة للحريق ويرجع ذلك إلي التحلل أو التكسير الكيميائي الذي يحدث في بنية الحجـــر كمـــا ينتج عن الفرق بين التمدد الحجمي للحبيبات المعدنية المكونة للحجر أو الصخر مما يسبب اجهادات تؤدي إلي ضغوط كبيرة تنتهي بالتشققات والانهيارات التي تحدث لبنية الحجر بالإضافة إلي الاسوداد والتمزيق والأكسدة وعملية الاســـوداد Blacking تنتج من ترسب المواد الكربونية أو القطرانية والآتية من التحليـــل الحراري للخشب أو المواد العضوية أو القطنية داخل المباني وعملية الاســـوداد لا تؤثر مباشرة على الحجر ولكن إزالته تسبب بعض التلـــف وخصوصـــا اذا تخللت المواد القطرانية مسام الحجر .

أهم عوامل وقوي التلف التي تتعرض لها الآثار الحجرية

أتفق العلماء والباحثون في مجال ترميم وصيانة الآثار على أن دراسة قوى التلف المختلفة التى تهاجم الآثار بشتى أنواعها ومكوناتها تعتبر أولى خطوات العلاج السليم وذلك لأن هذه الدراسة تضع في اعتبارها العلاقة بين البيئة وآلياتها المختلفة ومدى قدرة الأحجار الأثرية على مجابهتها.

وما من شك أن عملية تلف الأحجار الأثرية تعتبر من المشاكل المعقدة عديدة الجوانب والتي كانت دوما محط اهتمام الأنشطة البحثية في السنوات الأخيرة التي أوضحت بدورها أن مقاومة الأحجار لعوامل التلف المختلفة تعتمد على خواص الحجر الميكانيكية والفيزيائية بالإضافة على اعتمادها على الظروف المحيطة بها وقد قام العديد من الباحثين بدراسة الدور المدمر لقوى التلف من خلال دراسة مظاهر التلف الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية وكذلك ما تسببت فيه يد الإنسان من دمار للآثار يكون غالبا أقوى من العوامل السابقة.

ويرى كثيرا من العلماء أنه لابد عند دراسة عوامل وقوى التلف المختلفة أن نبدأ بالنظرة الشمولية التي ترتكز على أسس علمية حيث أن هذه العوامل وتلك القوى لا تعمل بصورة منفردة ولكنها في معظم الأحيان تعمل بصورة متكاملة بحيث يؤدى أكثر من عامل وقوة تلف إلى إحكام دائرة التلف حول الأثر وفوق سطحه وأسفل هذا السطح بحيث تؤدي في النهاية إلى تلف الأثر فيزيائيا وكيميائيا ، وحتى في بعض الأحيان التي ينفرد فيها عامل واحد من عوامل التلف بإحداث التلف بمظاهره المختلفة أو ينفرد بالدور الرئيسي في تنشيط ميكانيكية التف بكل مراحلها المختلفة، إلا أنه يمكن القول بأن خطورة هذه العامل تتوقف علي دور العوامل الأخرى الملازمة له في الظروف المحيطة

بالأثر في استكمال دائرة وميكانيكية التلف التى يجب النظر إليها على أنها حلقة متصلة ومراحل متتابعة من مراحل تلف الأثر فيزيائيا وكيميائيا.

لذلك فإن تقسيم عوامل التلف إلى عوامل خارجية تهــاجم الأثــر مــن الخارج وأخرى داخلية تعمل علي تلف مكونات الأثر من الداخل وكذلك عوامل بشرية يكون أقرب إلي الواقع مع الأخذ في الاعتبار أن هذا التقسيم لا ينــاقض الحقيقية القائلة أن معظم عوامل التلف تعمل مجتمعة على تلف الأثر.

أولا : أهم العوامل الداخلية التي تسبب تلف الآثار الحجرية

Endogenous factors

تلعب البنية الداخلية للأحجار دورا هاما فــي تلــف الأحجــار وذلــك لاحتوائها علي بعض المعادن القابلة للتغيــر تحــت ظــروف توزيــع الجهــد والظروف البيئية كالتغيرات الحرارية والمياه بالإضافة إلى الخواص الكيميائيــة والفيزيائية، ومن أهم هذه التغيرات:

١. التغير في التركيب المعدني:

تعتبر المكونات المعدنية للصخور النارية والمتحولة التي نشأت تحــت ظروف غير عادية من الحرارة والضغط غير ثابتة تحــت الظــروف العاديــة بالإضافة إلى ما قد تتعرض له من ضغوط غير محسوبة نتيجة للتحميــل فــي الأحجار التى فقدت الحبيبات المكونة للصخر، وتظهر هذه الحالة بوضوح علي أسطح الصخور الجرانيتية خاصة القريبة من الأراضي الزراعية التــي تمــدها بالرطوبة حيث يلعب الماء دورا هاما وخطيرا على بعض المعــادن المكونــة للجرانيت مما يؤدي إلي تحللها إلي معادن أخري تختلف في التركيب الكيميائي والخواص الفيزيائية عن المعادن الأصلية خاصة إذا احتوى الماء علي حمــض ضعيف ومن أهم الأمثلة علي عملية التغير المعدني تحول معادن الفلسبار إلــي

معدن الكاولينيت، كما تظهر هذه الحالة في الأحجار الرملية المحتوية علي نسبة عالية من معادن الفلسبارات حيث تتحول إلى المعادن الطينية التي بتعرضها لمصادر المياه تنزح إلي الخارج مؤدية في النهاية إلي ضعف الترابط بين الحبيبات وتفتت مكونات الحجر.

كما توجد أنواع أخرى من التداخلات تؤدي إلى تغير التركيب المعدني والخواص الفيزيائية للمعادن المكونة للصخور مثل فقد الجبس لماء التبلور وتحوله إلي معدن الأنهيدريت والذي ينتج عنه تقلص في حجم البلورة المعدنية مما ينشأ عنه العديد من التشرخات والتشققات الدقيقة التي تزيد من معدل المسامية للصخر.

كما أن عملية التأكسد تؤثر بصورة رئيسية علي المعادن المحتوية علي مركبات الحديدوز والتي تتأكسد إلى الحديديك وباكتسابها لماء التبلور يزداد حجمها طبقا لذلك مضيفة إجهادات أخرى علي بنية الحجر بالإضافة إلي تغير لون الحجر الذي تتلون أسطحه باللون البني أو الأصفر.

٢. الإجهادات الداخلية:

تنشأ الاجهادات الداخلية بشكل واضح في الصخور المسامية، وتتكون الاجهادات الفعالة داخل مادة الصخر من نوعين رئيسيين:

أولهما: ضغط الماء المسامي بما يسمي الضغط المتعادل الذي يؤثر بصورة متساوية وبنفس الشدة في جميع الاتجاهات وذلك نتيجة لوجود شبكة من التشققات الدقيقة في بنية الصخور المتبلورة والهشة.

أما النوع الثاني: من الاجهادات الفعالة داخل بنية الحجر فهو ما يعرف بإجهاد ما بين الحبيبات وعادة ما ينشأ هذا الاجهاد نتيجة لتجمد الماء بين المسام أو

نتيجة لتبخر الماء الداخلي مخلفا وراءه البلورات الملحية داخل المسام الكبيرة نسبيا والقنوات الداخلية.

وبصورة عامة تشمل عوامل التلف الداخلية كل ما يتعلق بالخواص الطبيعية والكيميائية والميكانيكية للأحجار ما لم تكن هذه الخواص مثالية، هذا بالإضافة إلى العيوب التركيبية الموجودة أصلا في الصخر والتي تظهر بوضوح في الصخور النارية مثل بعض التراكيب التى تنشأ أثناء تصاعد الماجما إلى سطح القشرة الأرضية والناتجة عن عدم مقدرة الماجما على التخلص من غازاتها وأبخرتها مثال التركيب الفقاعي والتركيب الخلوي والتركيب اللوزي الأميجدالي، كذلك فهناك العديد من العيوب الناتجة عن التراكيب الجيولوجية لبعض الصخور الناتجة عن الحركات الأرضية كتراكيب الفواصل وتراكيب الطبقات.

وبالرغم من أن المصري القديم قد أدرك الكثير عن بعض العيوب الناتجة من التراكيب الجيولوجية للأحجار التى أقتطعها من المحاجر لاستخدامها في تشييد معابده ومقابره وقد نجح في معظم اختياراته في كثير من الأحوال إلا أنه في بعض الأحوال ونتيجة بعض الأخطاء في هذه الاختيارات يمكن أن تنتج بعض الشروخ والكسور أو فقد بعض الأجزاء من الكتل الحجرية المشغلة عند تعرضها لعوامل التجوية المختلفة حيث نجد أنه مهما كانت جودة ودقة التصميم فإنه عادة ما يتلف بواسطة التحديد غير الوافي بالغرض للمواد والمكونات الحجرية حيث أن أختيار بعض من هذه الأحجار بدون تحري الدقة الكاملة قد يؤدي إلي حدوث مزيد من التلف عند تعرضها لعوامل التلف الأخرى.

ثانيا : العوامل الخارجية Exogenous Factors

تعتبر العوامل الخارجية المصدر الرئيسي لاستمرار عمليات التلف المختلفة حيث تكون بإتحادها مجموعة متشابكة من التأثيرات لا يمكن فصلها عن بعضها، هذا فضلا عن التأثير الفردي لكل عامل على حده وإن كان هذا التأثير ضئيلا للغاية إلا أنه بمرور الزمن تظهر آثاره واضحة علي أسطح الآثار الحجرية. وتشمل العوامل الخارجية المؤثرة علي الآثار الحجرية الرطوبة بمصادرها المختلفة سواء كانت ناتجة من الرطوبة الجوية أو الأمطار أو مياه الرشح والنشع، وكذلك الأملاح والتلوث الجوي والتباين في درجات الحرارة هذا إلي جانب تأثير الكائنات الحية الدقيقة والتلف البشري وأخيرا الاجهادات الناتجة عن تأثير الاهتزازات من المصادر المختلفة.

١ – التغيرات المستمرة في درجات الحرارة

Continues change of air Temperature

أن التغيرات المستمرة في درجات الحرارة الجوية في صورها اليومية والموسمية Seasonal Variation والسنوية Annual Variation تعتبر من أهم التغيرات التي تعمل علي تلف الأحجار الأثرية فيزيائيا وكيميائيا.

فالتغيرات اليومية تعتبر أشد هذه التغيرات خطورة علي مكونات الأحجار المختلفة ، ومن المعروف أن المباني الأثرية قد شيدت من أحجار مختلفة مثل الأحجار الرسوبية والنارية والمتحولة وهذه الأحجار تختلف عن بعضها في خصائصها الفيزيائية ومكوناتها المعدنية ولهذا تختلف هذه الأحجار عن بعضها في التأثر بالتغيرات المختلفة في درجات الحرارة الجوية في الوسط المحيط.

أما الأحجار الرسوبية: التي تكونت علي هيئة طبقات رسوبية مختلفة في السمك والتكوين المعدني فضلا عن أن بللوراتها أو حبيباتها تعتبر من البللورات المستقلة التي ترتبط مع غيرها من البللورات بواسطة المادة الرابطة كما هو الحال في بلورات الكالسيت الموجودة في الحجر الجيري التي ترتبط بمادة الكالسيت أو معادن الطفلة كما أن بلورات الكوارتز الموجودة في الحجر الرملي ترتبط بمواد رابطة عديدة أشهرها "السليكا وأكاسيد الحديد المختلفة" ونظرا للفراغات البينية الموجودة بين هذه البللورات فإن الحجر الرسوبي يمتص كميات من درجات الحرارة المرتفعة تختلف علي حسب اختلاف حجم البلورات وسعة الفراغات البينية. ولذلك يمكن القول بأن الحجر الرسوبي في معظم الأحيان لا يعاني بشدة تأثير أرتفاع وانخفاض درجات الحرارة في الوسط المحيط لأن الحرارة المرتفعة أو المنخفضة تتحرك داخل الفراغات البينية في سهولة ويسر وخاصة إذا كانت الفراغات البينية الموجودة بين بللورات هذا الحجر متسعة، ونظرا لاختلاف الأحجار الرسوبية فيما تحتويه من مكونات معدنية فإن عوامل التمدد والانكماش تختلف طبقا لاختلاف نوع الحجر فالحجر الرملي خشن الحبيبات يسمح بدخول الحرارة المتسربة بين مكونات الحجر أما الحجر الرملي الناعم الحبيبات فإن تسرب هذه الحرارة بين مكوناته يعتبر صعبا نظرا لقلة الفراغات البينية بين هذه الحبيبات المعدنية كما أن الحجر الرملي الذي ترتبط حبيباته بمادة السيليكا يعتبر أكثر مقاومة لتأثير التغيرات المختلفة لدرجات الحرارة من الحجر الرملي الذي ترتبط حبيباته بمادة الكالسيت التي لا تتأثر إلي حد بعيد بارتفاع وانخفاض درجات الحرارة الجوية في الوسط المحيط.

أما الصخور النارية وبعض الصخور المتحولة: والتي تقل فيها الفراغات البينية إلي حد بعيد فإنها تتأثر إلي حد بسيط وخطير بالتغيرات المستمرة في درجات الحرارة في الوسط المحيط فعند أرتفاع درجات الحرارة

في نهار الصيف تتسرب هذه الحرارة إلي سطح الحجر ويصعب مرورها إلــى أسفل هذا السطح إلا بعد ساعات طويلة ومع حلول الليل تصبح درجة حــرارة سطح الحجر أكثر أرتفاعا من داخل هذا الحجر ولذلك نجد أن المكونات المعدنية لهذا السطح تكون في حالة تمدد بينما المكونات المعدنية البعيدة عن السطح فــي حالة انكماش ومع مرور الوقت تتسرب الحرارة ببطء إلي داخل الحجر وخاصة مع حلول الليل وفي هذه الحالة يحدث تمدد للمكونات المعدنية داخل الحجر بينما سطح الحجر نفسه يكون قد برد وانخفضت درجة حرارته وفي ظل اســتمرار هذه الظروف غير الملائمة يتعرض الحجر الناري وخاصة الجرانيــت للتلــف الناجم عن عملية التمدد والإنكماش غير المنتظمة وغير الثابتة مما ينــتج عنــه ضغوط وإجهادات مختلفة في اتجاهات مختلفة ينتج عنها فــي النهايــة ظهــور تشققات غير منتظمة في اتجاهات مختلفة مما يساعد على تكسر الأحجار وتفتت معادنها مما يطلق عليه ظاهر التقشر الميكانيكي Mechanical Exfoliation والذي يحدث في أشكال إنفصال صفائحي موازي لسطح الحجر وفــي بعــض الحالات تتعرض كتل ذو طبقات متكاملة من الحجر للسقوط نظــرا لاخــتلاف معامل التمدد والانكماش بين المكونات المعدنية المختلفة وبين طبقــات الحجــر المختلفة عند ارتفاع درجات الحرارة وانخفاضها عن الوسط المحيط ، كمــا أن تعدد ألوان هذه المعادن قد يسبب إختلافا في مدى مقاومتها لــدرجات الحــرارة حيث أن المعادن المظلمة مثل الأوليفين تكون ذات قدرة أكبر علي إمتصــاص الحرارة عنها عن المعادن المضيئة مثل الكوارتز مما يجعلها موضع إختلافــات حرارية بين حبيبات الصخر وينتج عن ذلك خاصية التفكك الحبيبــي للصــخر Rock Disintegration Granular، كما تؤثر عدة عوامل أخرى في قــدرة الصخر علي امتصاص الحرارة أهمها درجة تحبب الصــخر و ملمســة واتجاه الرياح الحاملة للحرارة ومقدار الرطوبة حول الأثر.

أما عن دور الحرارة في تلف الأحجار كيميائيا فيكمن في تبلور وإعادة تبلور الأملاح داخل مكونات الحجر أو فوق سطحه عند أرتفاع أو انخفاض درجة الحرارة، كما أن اختلاف درجات الحرارة ينتج عنه زيادة نفاذية الأحجار والتي تعمل بدورها على تسهيل دخول مياه الأمطار لمسافات داخل الكتل الحجرية والقيام بالتحلل الكيميائي للمعادن المكونة والذي يعمل بدوره على توسيع الشقوق والفجوات.

٢- التغيرات المستمرة في الرطوبة النسبية

Continues change of Relative humidity

إن التغيرات المستمرة في معدلات الرطوبة النسبية في صورها اليومية الموسمية والسنوية في الوسط المحيط بالأحجار الأثرية يشكل خطورة بالغة علي مواد البناء المختلفة وخصوصا تلك المكونات التي تتأثر بالمياه والرطوبة، ومن المعروف أن التغيرات المستمرة في معدلات الرطوبة النسبية في صورها اليومية تعتبر أخطر من تغيرات الرطوبة النسبية في صورها الموسمية والسنوية علي المكونات المعدنية لمواد البناء ويبلغ التأثير الضار للرطوبة النسبية مداه في الفترة التي تسبق شروق الشمس وخصوصا في موسم الشتاء البارد.

وكما سبق أن ذكرنا أن للمعدلات أو للتغيرات المستمرة في معدلات درجات الحرارة الجوية تأثير ضار علي الأحجار ومكوناتها المعدنية المختلفة حيث تؤدي هذه التغيرات إلي تلف فيزيوكيميائي لهذه المكونات فإن للتغيرات المستمرة في معدلات الرطوبة النسبية في الوسط المحيط نفس التأثير الضار الذي يؤدي إلي تلف هذه المكونات تلفا فيزيوكيميائيا.

ولا شك أن تسرب الرطوبة إلي داخل الأحجار بكميات كبيرة يتوقف علي عدة عوامل أهمها ما يلي:-

"درجات الحرارة المنخفضة في الوسط المحيط –إرتفاع درجة مسامية هذه الأحجار – الملمس الخارجي لسطح الأحجار ".

فإن توفرت هذه الظروف فإن الرطوبة النسبية إذا أرتفعت معدلاتها في الوسط المحيط بالأحجار الأثرية تتسرب إلي داخل مكونات الأحجار فتحدث بها أضرار جسيمة حيث تعمل علي إذابة الأملاح المتبلورة التي تتحرك في مثل هذه الظروف إلي أماكن متفرقة من طبقات الأحجار فتتلفها كما أن الرطوبة تعمل علي إذابة المواد المعدنية القابلة للذوبان في الماء مثل معادن الطفلة التي توجد في الحجر الجيري وبعض أنواع الأحجار الرملية فتتسبب في تفتتها وانهيار تركيبها الداخلي ومكوناتها وتعمل علي تهيئة الظروف الملائمة لنمو الفطريات ومعظم الكائنات الحية الدقيقة التي تتعايش وتمارس نشاطها الهدام سواء فوق أسطح الأحجار الأثرية الرطبة أو أسفل هذه الأسطح.

كما تتسبب الرطوبة في إحداث تغيرات معدنية داخل الأحجار حيث يمكن تغيير معادن الفلسبار إلى معادن الكاولينيت وهي من المعادن التي تتأثر إلى درجة كبيرة بالماء. تلك هي بعض مظاهر التلف الكيميائي التي تتسبب الرطوبة النسبية بمعدلاتها المرتفعة في إحداثها أما التلف الفيزيائي الناشئ بمنشأ هذه الرطوبة النسبية فتسببه الرطوبة المتسربة بكميات وفيرة داخل الأحجار عالية المسامية. حيث تؤدي إلي أنفصال طبقات الأحجار التي ترتبط بمواد قابلة للذوبان في الماء مثل الحجر الجيري الطفلي والطوب اللبن كما أن وجود هذه الرطوبة داخل مكونات الأحجار ينشأ عنه ضغوط وتوترات داخلية تؤدي في النهاية إلى تشرخ وتشقق طبقات وأسطح الأحجار المختلفة أما الرطوبة المنخفضة أو ذات المعدلات الثابتة في الوسط المحيط بالآثار أو بداخل المقابر المصرية القديمة كما هو الحال في مقبرة نفرتاري بالإقصر ومقابر تل العمارنة فتعمل علي تبلور الأملاح وتحركها نحو سطح هذه الآثار القديمة فضلا عن

انكماش الحبيبات المعدنية التي تدخل في تركيب أو تكوين الأحجار وتحركهـا وقلة تماسكها وتصبح مجرد حبيبات في حالة اتصال ضعيف مع بعضها أو في بعض الأحوال تصبح مجرد حبيبات منفصلة وهشة. ولا يقتصر الأمر علي تلف هذه الحبيبات بل أن طبقات الحجر نفسها تتأثر إلي حد بعيد بالتغيرات المستمرة في معدلات الرطوبة النسبية سواء بالزيادة أو النقصان ويعتمد الأثـر المتلـف للرطوبة علي عوامل عديدة من أهمها، سلوك المواد الأثرية الحجريـة معهـا خواص هذه المواد – مقياس حبيباتها – محتواها المعدني وموادها الرابطـة – بنائها المسامي وطبقا لما حدده العلماء فإن الرطوبـة النسـبية للهـواء تـزداد خطورتها حينما تتراوح نسبتها بين ٧٥% – ٩٠%.

وتعتبر الرطوبة قاسما مشتركا في معظم عمليات التجويـة الكيميائيـة للأحجار سواء عمليات الأكسدة أو التكربن أو الإذابة أو التحلل المـائي والتـي ينتج عنها في النهاية عدة مظاهر متلفة منها ظـاهرة أقـراص عسـل النحـل Haney Camp وهي عبارة عن ثقوب متجاوزة تظهر في واجهـات المقـابر الحجرية الجيرية وذلك لسهولة نشاط فعل الإذابة بواسطة قطرات النـدى التـي غالبا ما تتحد مع ثاني أكسيد الكربون الجوي مكونة حمض الكربونيك الضعيف الذي له القدرة علي إذابة الحجر الجيري ومن ثم تكوين فجوات صغيرة سرعان ما تتسع وتتصل ببعضها مكونة فجوات صغيرة أو بيضاوية الشكل.

٣- الأمطار Rain water

تعتبر مياه الأمطار من المياه الحامضية وذلـك لأن الغـلاف الجـوي يحتوي بين مكوناته علي غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 الذي يذوب في ميـاه الأمطار ويتحول إلي حمض الكربونيك الذي يعتبر من الأحماض الضعيفة

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow H_2CO_3$$

وعندما تتساقط مياه الأمطار فوق الأحجار – ومواد البناء خاصة التي تحتوي علي نسبة كبيرة من كربونات الكالسيوم فإنها تتفاعل مع هذه المواد وتتكون نتيجة هذا التفاعل مادة بيكربونات الكالسيوم والماغنسيوم التي تتميز بسهولة ذوبانها في الماء.

بينما نجد أن المواد المعدنية الأخرى الموجودة في الأحجار مثل سليكات الكالسيوم والألومنيوم تعتبر أقل من المواد المعدنية السابقة تأثيرا بحمض الكربونيك وأكثر مقاومة لتأثير مياه الأمطار.

أما الأحجار الرملية فإن بعضها يحتوي على معادن السليكا – ميكا – الكلورايت – الفلسبارات" والتي تتأثر بسقوط الأمطار عليها ولكن علي المدي الطويل وطبقا لغزارة الأمطار حيث تقوم مياه الأمطار بإزالة Leaching الأيونات المعدنية من كالسيوم – الومنيوم – بوتاسيوم – صوديوم. بالإضافة إلي معادن الطفلة التي توجد كمادة رابطة في بعض أنواع الأحجار الرملية ..... ومن المعروف أن معظم الأحجار الرملية تتميز بإرتفاع درجة مساميتها والتي تسمح بتسرب كميات كبيرة من مياه الأمطار إلي داخل هذه الأحجار وعند تعرض هذه المياه للتبخر فإن طبقات الأحجار والمكونات المعدنية تفقد مياه الأمطار وتتكمش وفي حالة معادن الطفلة فإن تسرب مياه الأمطار داخل الأحجار تؤدي إلي انتفاخ طبقات ومكونات هذه الأحجار. ويحدث لها نتيجة هذه التحولات الفيزيائية والكيميائية أضرار خطيرة، وتتعرض الأحجار الأثرية للتلف الشديد في البلاد التي يتميز مناخها بسقوط الأمطار الغزيرة والواقع أن الأحجار الآثرية بالإسكندرية تعتبر أكثر الأحجار تعرضا للتلف من جراء سقوط الأمطار في فصل الشتاء، والأمطار بما تحتويه علي غازات مثل غاز ثاني أكسيد

الكربون تشكل مع غيرها من عوامل التلف عوامل بالغة الخطورة علي مكونات البناء، فغاز ثاني أكسيد الكربون يتحول إلى حمض الكربونيك Carbonic acid في وجود الرطوبة الذي يهاجم مادة كربونات الكالسيوم فيحولها إلى بيكربونات الكالسيوم قابلة للذوبان في الماء التي تتحول مرة أخري إلى مادة كربونات الكالسيوم بعد تبخر ما بها من مياه والأخيرة تكون بلوراتها أكبر من مادة الكالسيت الأساسية مما يؤدي إلى نشوء ضغوط داخلية تؤدي في النهاية إلى تفسخ الأحجار.

والأمطار تساعد غازات التلوث الجوي المختلفة في التحول الكيميائي إلي أحماض تهاجم معظم مواد البناء فتتلفها.

كما تساعد الأمطار التي تتسرب إلي داخل مكونات البناء علي زيادة محتوي الرطوبة والذي يترتب عليه نمو الكائنات الحية الدقيقة التي تهاجم المواد العضوية وغيرها من المواد التي تدخل في تكوين مواد البناء فتحدث بها أضرار بالغة.

٤- التكثف Cindensation

تحدث ظاهرة التكثف داخل المقابر المصرية وغيرها من المعابد والآثار المختلفة عندما تنخفض درجة الحرارة في الوسط المحيط فيتحول الهواء الرطب في ذلك الوسط إلي قطرات ماء فوق أسطح الأحجار الأثرية أو أسفل هذه الأسطح.

ولا شك أن قطرات الماء الناتجة عن التكثف يمكنها أن تتسرب إلي داخل مكونات مواد البناء فتتلفها وخاصة المواد التي تتأثر إلي حد بعيد بالماء كما أن قطرات الماء هذه تكون بمثابة ممر تتسرب من خلاله المواد التي تكون متسربة داخل مكونات البناء إلي أسطح الأحجار الأثرية حيث تتعرض التبخر

عند ارتفاع درجة الحرارة في الوسط المحيط فتترك علي الأسطح ما جمعته من أملاح ذائبة التي تتبلور في تلك المناطق أو أسفل هذه الأسطح.

ويمكن القول بأن ظاهرة التكثف تعتبر من العوامل والقوي التي تسببت في تلف مقبرة "بانحسى" التي عثرت عليها هيئة الآثار المصرية بمنطقة عين شمس بالقاهرة .... حيث تسببت في تلف الألوان وتلف المادة الرابطة التي تربط بين حبيبات الأحجار المستخدمة في تشييد هذه المقبرة فضلا عن تلف مادة المونة المستخدمة في ربط كتل الأحجار.

ويمكن القول بأن تلف الأحجار ومواد البناء المختلفة بسبب تكثف قطرات الماء فوق أسطح هذه الأحجار ومواد البناء يفوق في خطورته التلف الناجم عن سقوط الأمطار وذلك لأن قطرات الماء المكثف تحتوي علي نسبة عالية من الأحماض وغازات التلوث الجوي ومن المعروف أن سمك قطرات الماء المكثف فوق أسطح الأحجار يعتبر قليلا وفي مثل هذه الظروف تمكن غازات التلوث الجوي من التحول إلي أحماض دون إزلحة من فوق أسطح هذه الأحجار كما هو الحال في حالة الأمطار المتساقطة فوق أسطح الأحجار التي تقوم بإزاحة غازات التلوث الجوي والأتربة من فوق هذه الأسطح ولا شك أن معظم أنواع الأحجار المسامية تتأثر إلي حد بعيد بظاهرة التكثف أما الأحجار ذات المسامية المنخفضة فانها تعتبر أقل تأثيرا بهذه الظاهرة.

٥- نحر الرياح Wind erosion

تعتبر الرياح والعواصف من العوامل الجوية والقوى الخارجية التي تترك بصماتها الضارة علي أسطح الأحجار الأثرية. والتي تتعرض لها بطريقة مباشرة فتتلف ألوانها وتشوه نقوشها.

كما أن الرياح تساعد علي نشوء ظروف متغيرة من حول الآثار والتي تتمثل في المناطق مخلخلة الهواء المحيطة بالآثار فيندفع إلى هذه المناطق الهواء الموجود داخل المسام التي خلت من الهواء فتترسب الأملاح في تلك الأماكن وتسبب أضراراً خطيرة.

وتتوقف خطورة الرياح علي سرعتها التي تقدر بالعقدة وعلي المصدر الذي هبت منه الرياح، فالرياح:التي تهب من المناطق الصحراوية الحارة تحمل معها حبيبات الرمال والطقس الحار مثل رياح الخماسين في مصر التي تؤدي إلي تغير الظروف الجوية من حول الآثار القائمة في المناطق الصحراوية.

فتحدث بها تلفا خطيرا في معظم الحالات كما هو الحال في تمثال أبو الهول) لذلك يتوقف خطورة الرياح علي صلادة الحبيبات المحمولة في الهواء علي طبيعة ونوع من الأثر وعلي مكان الأثر داخليا كان أو خارجيا.

وتترك الرياح المحملة بالحبيبات الصلدة بعض الظواهر المختلفة علي أسطح الأحجار الأثرية منها:

ظاهرة الفجوات الجانبية أو ما يسمى بالحزور الغائرة حيث يؤدي نشاط البري بفعل الرياح المحملة بالرمال إلي تأكل الطبقات اللينة الموجودة بتلك الأحجار والمكونة غالبا من المارك الجحر الجيري اللين علي حين تقاوم طبقات الحجر الصلد هذه العملية مما يؤدي إلي ظهور تلك الفجوات بعمق جانبي يتراوح بين عشرات السنتيمترات وحوالي المتر في بعض المواضع الأخرى وذلك تبعا لتقسيم الطبقات اللينة المتآكلة نفسها وقد يؤدي تتابع الطبقات اللينة مع الطبقات الصلدة في بعض المواضيع في واجهات المقابر الحجرية إلي ظهور الفجوات الجانبية متراجعة فوق بعضها في شكل حزوز بارزة يتباين سمكها أيضا تبعا لسمك الطبقات الصلبة نفسها وتتضح تلك الظاهرة بوضوح في

واجهات مقابر هضبة الجيزة ، كما تقوم الرياح بعمليات النقل حيث تقوم بنقـل الذرات الصخرية الدقيقة والرمال سوداء عن طريق التعليـق Suspension أو بالزحف للحبيبات الدقيقة الخشنة Creeping أو التـدحرج Ralling أو القفـز علي سطح الأرض Saltation وتقوم بترسيبها علي الأسطح الأثرية والأحجار مما يؤدي إلي طمس معالمها أما الرياح التي تهب من المناطق الباردة كما هـو الحال في تلك الرياح التي تهب علي منطقة الإسكندرية شتاءا فأنها تعتبر مسئولة عن تغير الظروف الجوية من حول الأحجار الأثرية الموجودة في تلك الأماكن والمناطق.

كما أن هذه الرياح عند عبورها البحر المتوسط تحمل معها كميـات لا بأس بها من بخار البحر الذي يحتوي علي أملاح ذائبة بنسب وأنـواع مختلفـة فتتسرب هذه الأملاح داخل مكونات الأحجار الأثرية ومكونات البناء أو تتسبب عند سقوطها علي الأثر في تكوين طبقة ملحية سطحيه بعد تبخر الميـاه بفعـل الحرارة مما يؤدي مع إستمرار هذه الميكانيكية إلي زيادة التلف.

كما تعمل الرياح علي ترسيب حبيبات التاج ونواتج الغبار الصـناعي المنتشر في أجواء بعض المناطق الأثرية علي أسطح الأثر الحجري مما يؤدي إلي طمس معالمه .

ولا شك أن المقابر الرومانية بمنطقة كـوم الدكـة وكـذلك المسـرح الروماني وقلعة قايتباي بالإسكندرية وغيرها من المنـاطق الأثريـة والآثـار المعمارية تعاني أشد المعاناة من هجوم هذه الرياح وغيرها من عوامل وقـوي التلف المختلفة.

٦- المياه الأرضية وما بها من أملاح ذائبة

مما لاشك فيه أن مشكلة أرتفاع مناسيب المياه الجوفية من أهم عوامل تلف مواد البناء المستخدمة في المنشآت الأثرية لما لها من تأثير ضار باعتبارها مصدرا من مصادر انتشار الأملاح في تلك المواد بما تحمله من أملاح ذائبة تصل إلى جدران المنشآت الأثرية بفعل الخاصية الشعرية والتي تؤدي بدورها إلى تفتت وفقد مكونات أحجارها وما عليها من نقوش ومناظر ملونة.

وتعتبر المياه الجوفية مصدرا أساسيا من مصادر الرطوبة بجدران وأساسات المنشآت الأثرية والتي بدورها تعمل علي إذابة المادة الرابطة للأحجار الرسوبية المشيد منها هذه المنشآت مسببة تفتتها فضلا علي أن وجود الرطوبة تعمل علي تشجيع التجويه الكيميائية مؤدية إلى تحولات كيميائية لمعادن أحجار البناء.

وقد تؤدي زيادة نسبة الرطوبة بأحجار البناء المشيد منها المنشآت الأثرية إلي توفير الظروف المناسبة لتشجيع نمو الكائنات الحية الدقيقة مؤدية إلى تلف بيولوجي لها.

كما أن تذبذب مناسيب المياه الجوفية مع وجود بعض معادن الطين القابلة للتمدد والانكماش أسفل المنشآت الأثرية تؤدي إلى عدم الاتزان الاستاتيكي للمنشآت الأثرية المقامة علي هذه التربة.

ومن المعروف أنه حتى نهاية الخمسينات وبداية الستينات لم تكن الآثار والمواقع الأثرية تعانى من أخطار أرتفاع مناسيب المياه الجوفية وبمراجعة الظروف الهيدرولوجية السائدة قبل تلك الفترة نجد أن نظام الري للأراضي الزراعية كان موسميا ويعتمد علي فيضان النيل (ري الحياض) حيث كان مجرى نهر النيل يمتلئ في أشهر الفيضان (خمسة أشهر علي الأقل) في حين

تنخفض مناسيب المياه في النيل بقية العام. وحيث أن هناك اتصال هيدروليكي جيد بين مياه النيل والخزان الرباعي الجوفي الذي يمتد تحت وادي النيل ودلتا فإن مجري نهر النيل كان يعتبر مصرفا طبيعيا للخزان الجوفي في فترات انخفاض مناسيب المياه مما كان يحافظ علي ثبات مناسيب المياه الجوفية وتذبذبها حول قيم ثابتة تنخفض كثيرا عن مناسيب المنشآت الأثرية.

مع بداية الستينات وبناء السد العالي تغيرت المنظومة الهيدرولوجية بوادي النيل ودلتا حيث توفرت كميات كبيرة من المياه وتغير نظام الري من ري الحياض إلى الري بالغمر وأصبح مجري نهر النيل يمتلئ بالمياه علي مدار العام وعليه انخفضت كفاءة النهر كمصرف طبيعي للمياه الجوفية وعليه انخفض المتسرب من الخزان الجوفي وزادت مناسيب المياه الجوفية عن مناسيبها قبل إنشاء السد العالي.

وفي إطار خطة الدولة نحو رفع المستوى المعيشي تم تزويد معظم القرى بشبكات مياه الشرب النقية وفي غياب شبكات الصرف الصحي تم الاعتماد علي الخزانات الأرضية البدائية لصرف المخلفات الصحية والتي تصل بدورها إلي الخزان الجوفي مما يعد عاملا إضافيا لرفع مناسيب المياه الجوفية، وبازدياد معدلات التنمية تزايدت معدلات زيادة مناسيب المياه الجوفية حتى وصلت إلي مناسيب أساسات كثيرا من المنشآت الأثرية.

٧- دور الأملاح في تلف الأحجار الأثرية

إن دراسة هجرة المحاليل الملحية التي تنتقل إلي الأحجار مع المياه المتسربة إليها من مصادرها المختلفة وخاصة المصادر الأرضية تعتبر من الدراسات المعقدة لأنه من المعروف أن هذه المحاليل الملحية لا تبقي علي وتيرة واحدة وإنما هي دائمة التغير وخاصة من حيث درجة تركيزها ومكوناتها

الملحية التي تحدد إلى حد بعيد أنواع الأملاح التي سوف تتبلور داخل الأحجار أو فوق أسطحها بعد تبخر المياه الحاملة لهذه الأملاح بسبب أرتفاع درجة الحرارة في الوسط المحيط.

ويمكن تلخيص أهم مصادر الأملاح التي تكونت داخل الأحجار أو فوق أسطحها على النحو التالي:

ربما كانت هذه الأملاح أحد مكونات مواد البناء المستخدمة في هذه المقابر من أحجار وطوب لبن وجبس وجير. وعندما تهيأت الظروف لهذه الأملاح لكي تذوب في الماء نشطت وهاجرت إلي أسطح الأحجار الآثرية أو أسفلها حيث تبلورت مرة أخرى وشاركت في تلف هذه الأحجار ومن أهم هذه الأملاح .... كربونات الكالسيوم – كبريتات الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم والمغنسيوم والسيليكات.

لاشك أن المصدر الرئيسي لمعظم أنواع الأملاح المتبلورة فوق أسطح الأحجار ومكوناتها أو أسفلها يكمن في التربة التي شيدت عليها أو فوقها بعض المقابر والأحجار المصرية القديمة.

فمن المعروف أن التربة المصرية وخاصة في جنوب مصر تعتبر غنية بالأملاح الذائبة في الماء وخاصة أملاح نيترات الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم وقد تكونت هذه الأملاح داخل التربة بفعل نشاط الكائنات الحية الدقيقة وتفاعلها مع المركبات التى تحتوى علي مواد نيتروجينية عضوية داخل التربة وقد استطاعت الكائنات الحية الدقيقة أن تحول هذه المركبات إلي أمونيا والتي تأكسدت وتحولت إلى حمض النيتروز Nitric acid والذي يهاجم مكونات التربة العضوية ويحولها إلى أملاح النيترات.

ربما جاءت الأملاح من رذاذ البحر الذي يتميز بإحتوائه علـــي نسـب عالية من أنواع الأملاح أو قامت الرياح بحمل هــذه الأمـــلاح إلـــي مكونـــات الأحجار وهذا ما نلاحظه من أملاح بحرية ترسبت بالداخل ببعض مقابر كـوم الدكة الرومانية بالإسكندرية ويعتبر ملح الطعام أو كلوريد الصوديم "الهاليت" أهم هذه الأملاح Na Cl .

ربما جاءت هذه الأملاح من مخلفات الحيوانات والطيور ســواءاً التـي كانت ذائبة في التربة أو التي تجمعت فوق أسطح الأحجار الأثرية ولعبت المياه دورا أساسيا في إذابتها وتحركها إلي داخل مكونات الأحجار وتعتبر النيتــرات من أهم هذه الأملاح.

بعض الأملاح المتبلورة فوق أسطح بعض الأحجار الأثرية الملونة قـد نتجت من أعمال الترميم الخاطئة وخاصة عند التنظيــف بإســتخدام أحمــاض الكبريتيك و الهيدروكلوريك والتي تفاعلت مع مادة كربونات الكالســيوم التـي تدخل في تكوين معظم مكونات الأحجار ونتج عــن هــذه التفــاعلات أمــلاح كبريتات الكالسيوم وبعض السيليكات.

وعندما تتبلور الأملاح فوق الأسطح الحجرية بعد تبخر الميــاه نتيجـة أرتفاع درجة الحرارة وأنخفاض الرطوبة النسبية أو ثباتها في وسط المحيط فإن هذه الأملاح تتسبب في تشويه أسطح هذه الأجحار وتلف مكوناتهــا. أمــا إذا تبلورت هذه الأملاح أسفل هذه الأحجار فإنها تهدد بمرور الوقت هذه الألــوان بالسقوط أو الانفصال عن الأسطح التي تقع أسفلها مع زيــادة حجــم بللــورات الأملاح التي تدفع طبقة اللون إلي الخارج فتســقطها أو تتســبب فــي تشــققها وتشرخها. بينما إذا تبلورت هذه الأملاح بين مكونات طبقات الأحجار المختلفـة فإنها تهدد هذه الطبقات بالإنفصال عن بعضــها وبالتــالي تتعــرض مكونــات الأحجار جميعها إلــي الســقوط بفعــل عوامــل وقــوى التلــف الأخــرى و

للتجوية الملحية شقية، شق كيميائي يتمثل في أن النسب عالية التركيز من الأملاح تؤدي إلي تلف الصخور ومكوناتها المعدنية محولة معادنها الأصلية إلي معادن ذات خصائص كيميائية جديدة تختلف سواء في تركيبها الكيميائي وشكلها البلوري في عملية كيميائية معتقدة الخطوات تعرف بإسم عملية التحلل الكيميائي Chemical Decomposition .

ودور فيزيائي يحدث عند تبلور محاليل زائدة التشبع بالأملاح التي يمنها الإنتقال إلي الحجر، وتحت الظروف الملائمة من الإختلاف في درجات الحرارة والرطوبة تبدأ أبخرة الماء في التقاعد مرسبة للأملاح علي السطح فيما يعرف بعملية التزهر Efflorescence أو بين المسام وداخلها وهو ما يعرف بظاهرة التزهر السردابي أو الخفي Crypto Efflorescenece وحيثما تنمو البلورات فإنها تحدث إجهادات علي حدود الفواصل الصخرية وعلي حبيبات الصخر مما يؤدي إلي تفكك حبيبي Granular Disintegration ، ويعتمد التلف الناشئ عن تبلور الأملاح في هذه الحالة علي نوع الأملاح المشاركة في التلف وكذلك علي مقاومة الحجر وفراغاته المسامية ودرجة التبلور لهذه الأملاح والتي تعتمد بدورها علي درجة الحرارة والرطوبة المحيطة.

وقد أشار Caake إلي أن الإصابة الملحية للأحجار تتوقف علي مدى تمدد الأملاح بالحرارة داخل مسام الصخر وخاصة مع إرتفاع درجات الحرارة حيث تتأثر البلورات الملحية بالفارق الحراري اليومي حيث تؤدي إلي تغير في أحجامها إلي درجة يمكن أن تتسبب في تفتيت الأحجار، ويكمن الخطر هنا في كون معاملاتها التمدد بفعل التميؤ لمعظم الأملاح الشائعة عادة ما تكون أعلى منها في معظم الأحجار حيث أن حجم بلورات الأملاح تختلف تبعا لكونه محتويا علي الماء Hydrated أو كونه لا يحتوي مطلقا عليه unhydrated حيث تكون بلورة الثاني أقل في الحجم من مثليتها من نفس الملح محتويا علي الماء.

ومن خلال ملاحظتنا لبعض المقابر والأحجار الآثرية في مصر والتي تتعرض للتلف يمكن تلخيص أهم مظاهر التلف التي لعبت الأملاح دورا هاما في تكوينها سواء فوق أسطح الأحجار أو داخل المكونات المختلفة لهذه الأحجار وذلك علي النحو التالي:

لوحظ في بعض مقابر كوم الدكة الرومانية بالإسكندرية أن أملاح كبريتات الكالسيوم قد تبلورت علي هيئة عروق بيضاء فوق أسطح طبقة الألوان وأسفل هذه الطبقة وفي هذه الحالة تحولت طبقات الألوان إلى طبقات شبه منفصلة عن الطبقات التي تقع أسفلها ولا شك أن هذه الأملاح قد تكونت بفعل تفاعل ثاني أكسيد الكبريت والذي يعتبر أشهر غازات التلوث الجوي مع مادة كربونات الكالسيوم التي تدخل في تكوين مكونات الصور الجدارية وكذلك الأحجار في هذه المقابر ونتج عن هذا التفاعل أملاح كبريتات الكالسيوم.

ويتميز ملح كلوريد الصوديوم بقدرته الفائقة علي امتصاص كميات كبيرة من الماء من مصادرها المختلفة ويقوم بنقلها إلي أماكن مختلفة داخل مكونات الأحجار طبقا لحركة المياه ولقد لوحظ تأثير هذا الملح الضار داخل العديد من مقابر الفراعنة في وادي الملوك بالأقصر.

لوحظ تكون طبقة ملحية صلبة فوق أسطح طبقة ألوان صور الفرسكو التي كانت تزين كنيسة قبطية عثر عليها بواسطة بعثة الآثار البولندية بمدينة فرس جنوب بلاد النوبة.

وقد بذل خبراء الترميم والصيانة الذين كانوا يعملون في هذه البعثة جهوداً مضنية في سبيل إزالة هذه الطبقة الملحية الصلبة أثناء عمليات الصيانة والترميم التي أجريت لهذه الصور الجدارية الملونة.

وقد أثبتت التحاليل التي أجريت على هذه الطبقة الملحية الصلبة أنها تحتوى علي ثاني أكسيد السيلكون أو "الأوبال" بالإضافة إلى أنواع السيلكات المختلفة والمختلطة بمادة كربونات الكالسيوم التي تدخل في مكونات الصور الجدارية لهذه الكنسية.

ولاشك أن هذا النوع من الأملاح يكون طبقة صلبة يصعب إزالتها بسهولة وتحتاج إلي مهارة عالية يجب أن تتوفر فيمن يقوم بمهمة إزالة وتنظيف هذه الطبقة من فوق أسطح طبقة الألوان.

أشهر أنواع الأملاح المتبلورة داخل الأحجار أو فوق أسطحها:

* الكلوريدات **Chlorides**

ليس من شك في أن الكلوريدات مثل كلوريد الصوديم (الهاليت)، كلوريد البوتاسيوم (السلفيت KCI) وكلوريد الكالسيوم (أنتركتسيت $CaCl_2 . 6H_2O$) تمثل أنواع الكلوريدات التي توجد متبلورة بصورة مختلفة داخل الأحجار أو فوق أسطحها، وتعتبر الكلوريدات من أخطر أنواع الأملاح التي تتسبب في تلف المنشآت الأثرية لما تتمتع به من درجة ذوبان عالية في الماء تمكنها من الانتقال إلى الأماكن المختلفة داخل الأحجار، بالإضافة إلى أنها تعتبر أملاحا هيجروسكوبية لها القدرة علي امتصاص كميات كبيرة من مصادر المياه المختلفة المحيطة بها، وعلى هذا الأساس يعتبر هذا النوع من الأملاح من مصادر جذب المياه داخل الأحجار والتي يترتب عليها تبلور أو إعادة تبلور هذه النوعية من الأملاح عند ارتفاع معدلات الحرارة في الوسط المحيط وفي مثل هذه الظروف تحدث تغيرات في أشكال وأحجام البلورات الملحية لهذا النوع من الأملاح حيث تتسبب هذه الضغوط في انتشار الشقوق والشروخ ذات الأشكال والأعماق المختلفة التي تحتوى علي هذه البلورات الملحية .

* الكبريتات Sulphates

تعتبر كبريتات الكالسيوم المائية $CaSO_4.2H_2O$ واللامائية $CaSO_4$ وكذلك كبريتات الصوديوم $NaSO_4$ بدرجات تميؤها المختلفة من أشهر أنواع الكبريتات التي غالبا ما توجد في صور تبلور مختلفة داخل الأحجار أو فوق أسطحها.

أما كبريتات البوتاسيوم K_2SO_4 وكذلك كبريتات الماغنسيوم $MgSO_4$ فنادرا ما توجد داخل الأحجار أو فوقها وخاصة تلك التي تتعرض لسقوط الأمطار.

ومن الجدير بالذكر أن المياه الأرضية ومياه البحار والبحيرات والأنهار تعتبر من المصادر المائية التي تحتوى علي أملاح الكبريتات الذائبة، كما أن أنواع الكبريتات وخاصة كبريتات الكالسيوم التي تكونت فوق أسطح الحجر الجيري أو الحجر الرملي جاءت نتيجة التفاعل الكيميائي بين كربونات الكالسيوم وحمض الكبريتيك الذي تكون بفعل غازات التلوث الجوي في ظل وجود الرطوبة.

ولقد أثبتت التجارب أن كبريتات الكالسيوم المائية و كبريتات الصوديوم المائية تتبلور من المحاليل الملحية التي وصلت إلى حالة التشبع القصوى، ومن المعروف أن أملاح الكبريتات أقل ذوبانا في الماء وأقل حركة داخل الأحجار من أملاح الكلوريدات ولهذا فإن حركتها داخل الأحجار تتم في الطور المائي لهذه الأملاح، وعندما تمتص هذه الأملاح المياه تتحول إلي أملاح متميئة Hydrated Salts حيث تشغل هذه المياه جزءا في تركيبها البلوري وبارتفاع درجات الحرارة في الوسط المحيط وعندما تصل معدلات الضغط البخاري للهواء إلي معدلات الضغط البخاري لهذه الأملاح المتميئة تبدأ هذه الأملاح في

التخلص من المياه التي أمتصتها حيث تتحول في النهاية إلي أملاح فاقدة للمـــاء Anhydrous Salts .

ومن المعروف أن التغير المستمر في أشكال وأحجام بلورات الكبريتات نتيجة امتصاص الماء أو فقدان هذه المياه التي تحتويها هـــذه الأمـــلاح بســـبب التغيرات الجوية في الوسط المحيط تنشأ الضغوط داخل الأحجار التي يترتـــب عليها تلف هذه الأحجار وانتشار الشقوق والشروخ المختلفة بها.

* النيترات **Nitrates**

أن أملاح النيتـــرات وخاصـــة البوتاســـيوم Niter KNO_3 ونيتـــرات الصوديم القلوية Soda Niter $NaNO_3$ ونيترات الكالســـيوم Nitro Cassite $Ca(NO_3)_2.4H_2O$ توجد بنسب ضئيلة بين الأملاح المتزهرة التي ترسبت فوق أسطح الأحجار الأثرية نظرا لسهولة ذوبانها في الماء عند تعرضـــها لســـقوط الأمطار أو الرطوبة النسبية التي تقوم بإذابتها ونزحها من فوق أسطح الأحجار.

وقد لوحظ أن النيترات تتركز فوق أسطح الأحجار وخاصة عند المناطق التي تحتوي علي مخلفات الطيور وأعشاش النحل البري التي تحتوي علي نسبة عالية من النيترات، كما يكثر وجود هذه الأملاح فوق أســـطح الأحجـــار التـــي شيدت فوق الأراضي الزراعية عالية الخصوبة أو التي شيدت فوق المقابر لأن هذه الأماكن تعتبر غنية بأملاح النيترات التي تتسرب إلى الأحجار الأثرية مـــع المياه القادمة إليها من التربة.

وهناك بعض أنواع النيترات مصدرها التلوث الجوي الذي يحتوي علي أكاسيد النيتروجين بنسب مختلفة ففي وجود الرطوبة تنشط هذه الأكاسيد وتتحول إلي حمض النيتريك الضعيف إذا ما قورن بحمض الكبريتيك القوي.

ورغم أن حمض النيتريك يعتبر من الأحماض الضعيفة إلا أن هذا الحمض يتفاعل مع كربونات الكالسيوم الموجودة سواء في الحجر الجيري أو الحجر الرملي حيث يتحول إلي نيترات الكالسيوم التي توجد علي هيئة بلورات ملحية ذات شكل أبرى.

ولا شك أن النيترات تلعب مع غيرها من الأملاح دورها هاما في تلف التركيب الداخلي للإحجار لأن هذه الأملاح تتميز بسهولة ذوبانها في الماء وحركتها المستمرة مع المحاليل الملحية داخل الأحجار من منطقة إلى أخرى، كما تتميز بلورات النيترات بإختلاف أشكالها وأحجامها، الأمر الذي يترتب عليه نشأة الضغوط المختلفة داخل الأحجار التي تتسبب في تلف هذه الأحجار وانتشار الشقوق والشروخ المختلفة بها.

* **الكربونات Carbonates**

تعتبر كربونات الصوديوم من الأملاح التي يندر وجودها كأملاح متزهرة فوق أسطح الأحجار التي تتعرض لسقوط الأمطار أو الرطوبة النسبية العالية التي تقوم بإذابة هذه الأملاح وإزالتها من فوق أسطح الأحجار، تتميز بوجودها في حالتين من حالات التميؤ وهما : أملاح الناترات $Na_2CO_3.10H_2O$ وكذلك أملاح الثيرموناترايت $Na_2CO_3.H_2O$ ، وتفاعلات كربونات الصوديوم تشبه إلى حد كبير تفاعلات كبريتات الصوديوم، ونتيجة هذه التفاعلات داخل الأحجار متشابهة . وبلورات الكربونات تتميز مثل غيرها من البلورات الملحية السابقة بالتغير المستمر في أشكالها وأحجامها البلورية.

أهم أشكال البلورات الملحية:

تتميز الأملاح التي تبلورت داخل الأحجار أو فوق أسطحها بأشكال بلورية متميزة طبقا لطبيعة ونوع الملح، ودرجة تركيز المحاليل الملحية التي

تحتوي علي الأملاح المختلفة، ودرجة مسامية الحجر التي تبلــورت داخلــه أو فوق سطحه، بالإضافة إلى التغيرات المستمرة في معدلات الرطوبــة النســبية والحرارة في الوسط الخارجي المحيط بالأحجار بصفة عامة أو الوسط الداخلي المحيط بالأملاح وقت تكوينها ونشأتها بصفة خاصة.

ومــن المعــروف أن البلــورات المنشــورية Prismatic Crystals والبلورات التي تشبه خصلات الشعر Hair Crystals أو البلــورات الأبريــة Acicular Crystals والبلورات الصــفائحية Tabular Crystals وكــذلك البلورات متساوية الوجوه Isometric Crystals والبلورات مكتملــة الشــكل Idiomorphic Crystals تعتبر من أهم الأشكال البلورية التي تميز الأملاح المتبلورة.

ولا شك أن الأملاح الذائبة في المحاليل الملحية تتميز بأن لكل ملح نقطة انتقال طوري مميزة لشكله البلوري وهذه النقطة تسمى نقطة التحول الطــوري المميزة وهذا ما يفسر وجود الأملاح المتبلورة داخل مكونات الأحجار أو فــوق أسطحها بأشكال بلورية مختلفة.

ويمكن القول بأن الأشكال البلورية للأملاح لا تبقي ثابتة علــي وتيــرة واحدة طالما أن هذه الأملاح المتبلورة تتعرض لمزيد من المحاليل الملحية التي تسربت داخل الأحجار من مصادر مائية مختلفة التي تقــوم بإذابــة الأمــلاح المتبلورة وتتسبب في تغير شكلها البلوري جزئيا أو كليا وطالما أن هذه المحاليل الملحية تتعرض باستمرار للتغيرات في معدلات الرطوبة النسبية والحرارة فــي الوسط المحيط التي تتسبب هي الأخرى في حدوث تغيرات في الأشكال البلورية للأملاح حيث ينتج عن هذه الأملاح المتكونة ضغوط داخل الأحجار المســامية الكربوناتية مما يؤدي إلي وجود شقوق دقيقة جدا أو زيادة عدد الفجــوات كمــا يفقد الأحجار تماسكها وأحيانا يؤدي إلي إنهيارها .

٨- التلوث الجوي Air Pollution

يعتبر التلوث الجوي من العوامل والقوى المتلفة للأحجار المستخدمة في أعمال البناء القديمة والحديثة علي اختلاف أنواعها وهو وليد الثورة الصناعية التي كان من نتائجها استخدام منتجات الزيوت البترولية المختلفة في إدارة الآلات بالمصانع التي تدفع مداخنها بكميات هائلة من الغازات والحبيبات والأيروزولات الملوثة للجو والتي تؤثر تأثيرا ضارا علي صحة الإنسان والحيوان. وقد أصبح التلوث مشكلة العصر بغير مبالغة ومشكلة العالم المتقدم علي وجه التحديد الذي أصبح يعاني من خطر التلوث المتزايد كأنما صار هذا التلوث هو الثمن الذي تدفعه الدولة كلما صعدت في سلم التقدم.

ولذا فإن كلمة تلوث أو تلوث البيئة أصبحت تستعمل للدلالة علي عدد من الظواهر، منها التغيرات التي تحدثها الأنشطة الصناعية ووسائل المواصلات في الهواء الجوي والماء بما تقذف من أدخنة ونفايات، كما يستخدم هذا اللفظ للتعبير عن الأضرار الجانبية التي تنتج دون قصد نتيجة الأنشطة التي يمارسها الإنسان بقصد التنمية والتعمير.

وقد عانى الإنسان من أضرار التلوث البيئي منذ زمن غير أنه يواجه في هذا العصر ومع بداية القرن الحادي والعشرين مصادر شتى تعاونت مع بعضها علي إفساد مكونات النظام البيئي ومظاهر هذا التلوث ومصادره من أهم الموضوعات التي تشغل فكر وجهد العلماء ومنهم علماء صيانة الآثار.

والتلوث الجوي Air Pollution يقصد به كل مادة طبيعية أو صناعية ينتشر وجودها في الهواء المحيط بالقشرة الأرضية سواء في صورتها الصلبة أو السائلة أو الغازية وتتسبب في إفساد الطبيعة وتقلل من درجة نقائها كما تتسبب في تلف البيئة التي تعيش فيها الكائنات الحية والإنسان والحيوان والنبات، كما

أن التلوث هو أخطر عوامل تلف الآثار والمقتنيات الفنية التـي تـدمر بنيتهـا الداخلية وتحولها بمرور الوقت والتقادم إلي مواد هشة.

وتمثل العديد من الأبنية التاريخية موضوعا هاما للتفاعل مع العوامـل والملوثات الجوية المختلفة ويتضاعف هذا التفاعل في كثير من الحالات خاصة عند توافر بعض العوامل العدوانية الأخري مثـل الطبيعـة العدوانيـة للتربـة ومكوناتها، ظواهر الإذابة، والصقيع، التقلبات الجوية الكبيرة في الحرارة البيئة النباتية وانتشارها حول الأثر، كما أن قوى التلف الناتجة عن التلـوث الجـوي تعتمد بقوة علي التركيب المعدني للحجر المجوي وطـرق تشـغيله والمسـاحة المعرضة منه للتلوث ومقدار ونسب الغازات الجوية ومدى تركيزها فـي ميـاه الأمطار المعروفة بالأمطار الحمضية.

والملوثات الجوية المنتشرة في الجو في صورة غازات مسئولة بدرجـة كبيرة عن التحطم والتفتت الواضح علي المباني التاريخية والأثرية هذا ويمكـن تقسيم مصادر الملوثات التي تؤثر بالتلف علي تلك المباني إلى نوعين أساسين:-

أ – مصادر ملوثة طبيعية Natural Agents of Pollution

ب– مصادر ملوثة صناعية Artificial Agents of Pollution

أولا : المصادر الطبيعية Natural Source

وهي تلك المصادر والمواد المتواجدة بصورة طبيعية في الجو كمكونات أساسية ولا دخل للإنسان في وجودها وتشمل:

* – ثاني أكسيد الكربون **Carbon Dioxide (CO_2)**

يعتبر غاز ثاني أكسيد الكربون من مصادر التلوث الطبيعية الذي يدخل في تركيب الهواء ومن المعروف أن هذا الغاز المنتشر في الجو عندما يتفاعـل

مع الرطوبة يتحول إلي حمض الكربونيك ورغم أن هذا الحمض يعتبر من الأحماض الضعيفة إلا أن المحاليل التي تحتوي على هذا الحمض إذا ما هاجمت مادة كربونات الكالسيوم الموجودة في بعض الأحجار الجيرية كأحد المكونات الرئيسية وفي بعض أنواع الحجر الرملي كمادة رابطة فإن هذه المادة تتأثر بهجوم هذا الحمض وتتحول إلى طبقة ملحية هشة من بيكربونات الكالسيوم Calcium Bicarbonate وبعد أن تفقد هذه المادة الأخيرة جزءا كبيرا من الماء الذي يدخل في تكوينها بسبب عامل التبخر فإنها تتحول إلي طبقة صلبة من كربونات الكالسيوم الأصلية مرة أخرى تترسب على الأسطح الحجرية في شكل طبقة صلدة تعرف ب Hard Crust وتخفي أسفلها النقوش الجدارية وتشوه سطح الحجر ويتم التفاعل طبقا للمعادلات الأتية:

$$- CO_2 + H_2O \longrightarrow H_2CO_3 + H\uparrow$$

$$- CaCO_3 + H_2CO_3 \longrightarrow Ca_2(HCO_3)\uparrow$$

$$- Ca(H.CO_3)_2 \longrightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O$$

طبقة ملحية هشة   طبقة صلدة

- **الأيروزولات الطبيعية Natural Aerosole**

وهي عبارة عن حبيبات معدنية متناهية في الصغر وخفة الوزن ومعلقة في الهواء وخاصة داخل المدن الصناعية أو الصحراوية أيام العواصف والرياح السريعة وتحتوي هذه الحبيبات علي السيليكا وكربونات الكالسيوم المتطايرة في الهواء ويضاف إلي هذه الحبيبات كبريتات المعادن القلوية المتصاعدة من بخار البحر ، ولا شك أن هذه الأيروزولات تساعد غازات التلوث الجوي في التحول

إلي أضرار [illegible] كما أنها تترسب علي أسطح الأحجار [illegible] والنقوش مما يؤدي إلي تشويهه

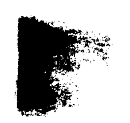
* ثانيا : مصادر [illegible] **Industrial Source**

وهي تلك [illegible] التي تتواجد نتيجة التقدم الصناعي الهائل الذي أحرزه الإنسان مما أدى إلي ظهور أصناف جديدة من المواد الكيميائية شاركت في قوى تلف الآثار بنسبة تتراوح ما بين ٧٠ – ٩٠% وذلك لما تحتويه علي العديد من الغازات والأحماض المعدنية وتشمل :

* غاز ثاني أكسيد الكبريت **Sulpher Dioxide**

يعتبر غاز ثاني أكسيد الكبريت من أهم غازات التلوث الجوي وأكثرها خطورة علي مواد البناء المختلفة وهو يتولد من أحتراق الكبريت والمواد المحتوية عليه مثل الفحم الذي تتراوح فيه نسبة الكبريت بين ١,٣ – ١,٥% والبترول بنسبة ٠,١% وزيت الوقود بنسبة ١,٢ – ٢,٦ % والغاز الطبيعي بنسبة ٠,٠٢%.

كما يتولد هذا الغاز من مخلفات الأفران والمداخن ومصانع الكيماويات وتزداد نسبته بصفة عامة في المدن الصناعية وقد أشار تقرير للمركز القومي للبحوث قام بدراسة للملوثات في هضبة الجيزة أن متوسط تركيز ثاني أكسيد الكبريت في الجو يترواح بين ١١ : ٣٤ جرام / م٣ بينما كان معدلات غاز ثالث أكسيد الكبريت SO_3 وحمض الكبريتيك H_2SO_4 مل بين ٧٢ : ١٩٢ ميكروجرام / م٣ وهذه النسبة تزيد عن الحد الأقصى المسموح به عالميا في مناطق الآثار وقد أشارت الدراسة إلى أن زيادة هذه النسبة من أكاسيد الكبريت يرجع مصدرها إلى المدن الصناعية بالقاهرة والجيزة وكذلك الأماكن المزدحمة بالسيارات كما أن وجود الأتربة المعلقة بمعدل يصل إلى خمسة أضعاف الحد



المقبول وكذلك تركيز الدخان أعلى من الحد المسموح به كل تلك العوامـــل أدت إلي زيادة فاعلية SO_2 في التأكسد. وفي ظل وجود إرتفاع في نســبة الرطوبــة الجوية وفي ظل تواجد أكاسيد الحديد علي سطح الحجر يــتم تحــول أكاســيد الكبريت إلى حمض الكبريتيك الذي يتفاعل مع كربونــات الكالســيوم $CaCO_3$ المكون الرئيسي للأحجار والنقوش الجيرية وطبقات المــلاط والمونــة مكونــا كبريتات الكالسيوم وهي مادة مسحوقية قابلة للذوبان والإزاحة بسهولة تتكون في صورة قشور Crusts أو بثرات Blisters أو تتجمع في المسام وكلها تسهم في تلف طبقات اللون وطبقات البلاستر الحاملة لها والأحجار بأنواعها وهذا التفاعل يسمى الكبرتة Sulphation ، وقد تتحول كبريتات الكالسيوم المتكونة إلي اللون الأسود نتيجة لأمتصاص الإتساخات مكونة قشرة سوداء مشوهة لسطح الأحجار والنقوش.

ويتم التفاعل طبقا للمعادلات الأتية:

$$* \ SO_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_3$$

$$* \ H_2SO_3 \xrightarrow{\text{oxidation}} H_2SO_4$$

$$* \ H_2SO_4 + Ca_3CO_3 \longrightarrow CaSO_4.2H_2O$$

ويهاجم حمض الكبرتيك كافة أنواع الآثار الحجرية خاصة المشيدة ، من الأحجار الجيرية ، وقد أشار Danes إلى دور أكاسيد الكبريت في تلف معادن الجرانيت في ظل وجود رطوبة عالية وتحولها إلى حمض الكبريتيك الذي يهاجم أسطح الجرانيت حيث يتحد آيون الهيدروجين H^+ الناتج من الحمــض وآيــون الكالسيوم Ca^{2+} الناتج من تجوية معدن البلاجيو كليز وبعض المعادن الإضافية

الأخري متحولا إلى الجبس الذي يتبلور داخل الجرانيت محدثا شـروخ دقيقـة تؤدي بدور ها إلى زيادة عدد الفجوات وإتساعها التي تكـون بمثابـة قنـوات لمحاليل الأملاح.

كما يهاجم الحمض الحجر الرملي الجيري بنفس ميكانيكية تلف الحجـر الجيري لكن بصورة أقل مما يؤدي إلي تفكك العديد من الحبيبات الرملية ، وعند تعرض الحجر لماء المطر فإن سطحه يتحول إلي مسحوق وعند زيـادة شـدة المطر فإن الحمض يهاجم بعض مكونات من الكالسيت محولا إياها إلي جـبس شديد الذوبان ، كما يؤثر الحمض بشدة في الحجر الرملي الطفلي وهوالمكـون من الكوارتز بالإضافة إلى مادة رابطة من الطفلة مهما كانـت نسـبة أكاسـيد الكبريت في الجو شديدة أو ضعيفة.

- **أكاسيد النيتروجين (No_x) Nitragin Oxides**

يحتوي الهواء الجوي علي مركبات نيتروجينيه عضوية مختلفة يصفها تقريبا يكون في حالة غازية والباقي يكون في حالة تكثف وتشمل الأولى أكاسيد متعددة للنيتروجين منها أكسيد النيتروز N_2O وأكسيد النيتريك NO_2 بالإضـافة إلى تواجده كنتاج للإنشطة البشرية الصناعية حيث أثبتت إحدى الدراسات التي قام بها جهاز شئون البيئة لرصد المكونات الجوية في سماء القاهرة والجيزة أن معدلات تركيز الأكاسيد النيتروجينية N_2O , NO_2 في الهواء الجوي يتـراوح بين ١٠٢ : ٦٠،٤ ميكروجرام/م٣ ويمثل هذا التركيز ضعف أو ثلاثة أضـعاف التركيز القياسي المعياري الذي وضعته بعض الدول وهو ٣٠ ميكروجـرام/م٣ وهو أقصى تركيز يمكن السماح به لأكاسيد النتيروجين في المنـاطق الأثريـة وتشير الدراسة إلي أن هذه التركيزات العالية من أكاسيد النتيروجين يرجع معظم إنتاجها محليا من السيارات وحرق الوقود من المناطق السكنية المجاورة وكذلك

إلي المخابز والورش والفنادق، إلي أن جانب منها منقول من أماكن بعيدة عــن طريق الرياح.

* وقد أثار Walter إلي أن غازات النيتروجين المنبعثة خلال النشاط الصناعي يمكن أن تمتص علي أسطح مواد البناء المستخدمة في المنشآت الأثرية حيــث يمتص غاز أول أكسيد النيتروجين NO ويتحول بسرعة إلي غاز ثاني اكســيد النيتروجين NO_2 والذي يتفاعل بدورة مع الرطوبة الجويــة ويكــون حــامض النيتروز وحامض النيتريك. Nitrous and Nitric Acid

طبقا للمعادلات الآتية

$$NO \longrightarrow NO_2 \longrightarrow NO_3$$

$$NO_3 + H_2O \longrightarrow HNO_3$$

$$HNO + HNO_3 \longrightarrow 2NO_2 + H_2O$$

$$2NO_2 + H_2O \longrightarrow 2H^{+} + NO_2 + NO_3$$

حيث يتفاعل هذا الحامض القوي مع مواد البنــاء الكربوناتيــة ليكــون أمــلاح النيتريــت والنتــرات Nitrite and Nitrate Salts وهــي طبقــة ملحية هيجروسكوبية سهلة الذوبان وتكون أسرع غسلاً من فوق أسطح الأحجار الأثرية حتى في الطبقات الصــلبة منهــا كــذلك يمكــن لنتــرات الكالســيوم المتكونة $Ca\ (NO_3)_2$ أن تتسرب إلى أسفل أسطح الأحجار مع ميــاه المطــر والتكثف وعند إمتصاص الحجر لها بعد ترســبها بــين مكوناتــه فــإن ذلــك يشكل خطرا كبيرا عليه وذلك بسبب تحولها سريعا من الطــور الرطــب إلــى الطور الجاف أى تبلور وإعادة تبلور خاصة عند حدوث تغيــر فــي معــدلات الرطوبة والحرارة في الوسط المحيط، هذا بالإضافة لكون النتــرات مصــادر

غذائية هامة لبعض الطحالب والأشنة مما يسهل لهذه الكائنات القيام بدورها في عمليات التحلل.

***غاز كبريتيد الهيدروجين Hydrogen Sulphide H_2S**

يعتبر غاز كبريتيد الهيـدروجين H_2S مـن الغـازات القليلـة نسـبياً بين غازات التلوث الجوي حيث يتكون سنويا مـن مصـادر التلـوث بنسـبة (٣ × ١٠^٦) وهو ينتج عن النشاط الصناعي وكـذلك المصـادر البيولوجيـة حيث يتأكسد هذا الغاز بتفاعله مع الأكسجين أو مع غـاز الأوزون O_3 كـذلك يمكن أن تتم عملية الأكسدة بواسطة تفاعلات التحلل الضوئي حيث يمكن لهـذا الغاز أن يتحول سريعا إلى غاز ثاني أكسيد الكبريت والكبريتات حيث يمكن أن يتحول إلى حامض الكبريتيـك H_2SO_4 بفعـل نشـاط أعـداد كبيـرة مـن بكتريا الكبريت والتي تزود النشاط الحمضي لتنشيط الإصابة علي الأحجار كما سبق توضيحه مع حالة غاز SO_2 .

*** الأيروزولات الصناعية Industrial Aerosols**

وينتشر وجود هذه الأيروزولات بكميات كبيـرة فـي أجـواء المـدن الصناعية والمزدحمة بالسيارات ومن المعروف أن هذه الأيروزولات تحتـوى على منتجات التلوث المختلفة ، وخاصة حبيبات الكربون والشعيرات ذات اللون الأسود، وقطرات الشحوم المختلفة إذا ما ترسبت هـذه المـواد علـي أسـطح الأحجار الأثرية فأنها تغطيها بطبقة سوداء تشوه مظهرها الخارجي فضلا عـن أن هذه المواد الملوثة تلعب دورها في مساعدة غازات التلـوث المختلفـة فـي التحول إلى أحماض متلفة كما سبق أن أشرنا.

* الأمونيا **Ammonia**

تتصاعد غازات الأمونيا بكميات وفيرة في أجواء المدن الصناعية وأيضا المزدحمة بالسيارات وخاصة تلك التي تستخدم الأزوت في عمليات الأحتراق ولا شك أن الأمونيا تساعد غازات التلوث الجوي مثل ثاني أكسيد الكبريت وغيره من الغازات في التأكسد والتحول إلي أحماض تهاجم مكونات مواد البناء المختلفة فتتلفها.

٩- التلف الحيوى **Biodeterioration**

تمثل الأحياء الحيوانية والنباتية عناصر أساسية في العديد من جوانب تجوية الأثار الحجرية سواء تجوية كيميائية أو تجوية فيزيائية، وتحدث التجوية البيولوجية بفعل الكائنات الحية الدقيقة خاصة البكتريا والفطريات والتي تعتبر عامل أساسي في دمار التركيب البنائي **Physical structure** والتكوين المعدني Mineral Constituents لمواد البناء المختلفة بالأشتراك مع عوامل التلف الأخرى وقد ذكر Yakushora أن الكائنات الحية الدقيقة والنباتات والحيوانات تلعب دورا هاما ومعقدا في التحلل الكيميائي للمعادن المكونة للأحجار Chemical Decomposition وأنه يجب الربط بين دور تلك الكائنات وعوامل التجوية الأخرى المسببة لتفكك الأحجار، هذا ويتحدد نوع التلف ودرجته بالنوع السائد من هذه الكائنات سواء كان فطريات أو بكتريا أو أشنة أو من النباتات أو الحيوانات.

وفيما يلي تأثير هذه الكائنات علي الأحجار:

* البكتريا **Bacteria**

وهي عبارة عن نباتات أولية دنيئة تتميز بصغر حجمها وتتراوح في قطرها ما بين ٠,٥ : ١ ميكرون وهي كائنات وحيدة الخلية وعند وجود الوسط الغذائي

المناسب تنمو وتتكاثر لتكون مستعمرة بكتيرية كما تحتاج لنموها لرطوبة عالية تتراوح بين ٦٠ : ٨٠ % وحرارة ما بين ١٨ : ٣٨°م ومحتوى حامضى(PH) ٦ : ٨ وقد تم تحديد نوعين مختلفتين من البكتريا التي ربما تشارك في تلف الأحجار وهما :

– البكتريا ذاتية التغذية **Autotrophic** : التي تستمد طاقتها من ضوء الشمس وعمليات الأكسدة و الاحتراق للمواد غير العضوية في الوسط المحيط، ويشمل هذا النوع البكتريا المؤكسدة للكبريت Sulphar Oxidizing B. والتي من أهم أنواعها *Th. thioparus, thio – Oxydanas, thiobacillus* حيث يمكن لها أن تنتج أحماضا عضوية مثل حمض الجلوكونيك، والكربونيك، والاكزاليك بالإضافة إلى حامض الكبريتيك الذي يتفاعل مع الأسطح الحجرية وخاصة الكربوناتية ويحولها إلى أملاح الجبس مما يؤدي إلي تحلل الأحجار والمونات ، كما أنه يمكن لهذا النوع من البكتريا أن يكون مواد متحللة قابلة للذوبان وتتكون هذه المواد من الكالسيوم والسليكا، كما يسبب هذا النوع فقد ملحوظ في الوزن الكلي لعينات الأحجار خاصة الجيرية والرملية، كما يمكن أن يمتص غازات الكبريت من الهواء ويحولها إلى حامض الكبريتيك الذي يزيد من تنشيط الإصابة للأحجار، كما أن هذه البكتريا هي المسئول الأول والرئيسي عن تكون الطبقات الملحية الكربوناتية في الطبقة السوداء علي سطح الأحجار.

وهناك نوع أخر وهي البكتريا المختزلة للكبريت Sulphar Reducing B. حيث تلعب دورا هاما في ترسيب أملاح الكربونات كما أنها تقلل من قيمة الأس الهيدروجيني للوسط الحيط عن طريق تحليلها للمواد العضوية وتكون الأحماض العضوية وأطلاق غاز CO_2 حيث تتم عملية الإذابة للكالسيوم، ثم تقوم بعد ذلك بإطلاق نسبة كبيرة من غاز كبريتيد الهيدروجين لرفع قيمة الأس الهيدروجيني في الوسط المحيط حيث يترسب ملح كربونات الكالسيوم، كذلك

فإن أطلاق غاز كبريتيد الهيدروجين بواسطة البكتريا المختزلة يتفاعل مع أيونات الحديد في الوسط المشبع بالرطوبة كما في حالة الحجر الرملي الحديدي الموجود كشائبة معدنية في مقبرة كوم الشقافة بالإسكندرية ومقابر الباويطي بالواحات البحرية حيث تتكون أملاح كبريتيدات الحديد التي تترسب مع كربونات الكالسيوم .

– **البكتريا النيتروجينية :** ومن أنواعها *Nitrosom* , *Nitrosovibro* حيث يؤكسد هذا النوع من البكتريا المركبات النيتروجينية للحصول علي الطاقة اللازمة لنشاطها ويعتبر التحلل البيولوجي للصخور الكربوناتية هو الأساس الأول في عملية النيترة. حيث تتحول كربونات الكالسيوم إلى ملح نيترات الكالسيوم القابل لإذابة في الماء مما يؤدي إلي تلف وتحلل المواد الكربوناتية وكذلك تحلل المواد الرابطة الدولوميتية، ويلاحظ أن هذا النوع من البكتريا ينمو أولا في صورة مستعمرات دقيقة ويزداد نموها إلى عدة آلاف والتي تعمل علي غلق المسام المكونة للأحجار.

ولا شك أن تكون أملاح النيترات ينشأ عنها ضغوط خطيرة داخل أحجار البناء نتيجة التغيرات الحجمية المستمرة خلال انتقالاتها وتحولاتها الطورية من الطور الرطب إلى الطور الجاف والعكس صحيح طبقا للتغيرات المستمرة في درجات الحرارة والرطوبة في الوسط المحيط، وينتشر هذا النوع من البكتريا علي وتحت أسطح الأحجار التي توجد عليها فضلات الطيور والحيوانات أو الأجزاء المعرضة لمياه الصرف الصحي كما في معبد حريشف بأهناسيا ومعبد رمسيس الرابع بعرب الحصن.

والنوع الأخر من البكتريا هي البكتريا غير ذاتية التغذية Heterphic والتي تستخدم العديد من المركبات العضوية المتنوعة كمصدر للكربون والطاقة اللازمة لنموها وتتمثل خطورة هذا النوع من البكتريا في إفرازها للعديد من

الأحماض العضوية وعلي الرغم من أنها أحماض ضعيفة ألا أنها خطيرة جـداً ولها علاقة مباشرة بتجوية الصخور وأحجار البناء.

الفطريات Fungi

وتعتبر من أهم العوامل البيولوجية المسئولة عــن التحلــل البيولــوجي لأحجار المنشأت الأثرية، ولا تحتاج الفطريات لضوء الشمس لنموها حيث أنها تعتمد أساسا علي المادة العضوية لكي تستمد طاقتها، وتظهر الفطريات في شكل بقع حيث تنتشر على السطح لتكون الغزل الفطري ذو الألوان المختلفــة طبقــا لنوع كل مستعمرة فقد تتراوح ألوانها بين اللون الأخضر أو الرمادي أو البني أو الأسود، وللفطريات احتياجات عديدة لنموها منها توافر مصدر مناسب من الماء والأكسجين، ودرجة حرارة مناسبة، المساحة المتاحة للنمو، مصــدر العــدوى، درجة حموضة تتراوح بين ٥ – ٧، ويذكر عبــد الهــادي أن أخطــر أنــواع الفطريات المؤثرة علي أحجار المنشأت الأثرية هي الفطريات ذاتيــة التغذيــة والتي تستمد طاقتها من خلال عمليات الأكسدة للمواد غير العضوية، كذلك يمكن للأحماض العضوية التي تفرزها هذه الكائنات أن تذيب معدن الكالسيت وبالتالي تحلل وتفتت الأحجار الكربوناتية والمادة الرابطة في الأحجار الرملية، كمــا أن هذه الأحماض تعمل علي إذابة ونزح السليكا بنســبة ٣١%، ونــزح مركبــات الألومنيوم بنسبة تتراوح بين ٠,٧ إلى ١١,٨ والحديد من ٢٥ : ٦٠% كمــا أن لهذه الفطريات القدرة علي تلف الأحجار المعالجة حيث تقوم الهيفات والغــزل الفطري المتسرب داخل الأحجار بتقطيــع الشــبكة البوليمريــة الناتجــة عــن الراتنجات المختلفة .

كما أن الأحماض الفطرية تساعد علي هجرة الأملاح الذائبة في المــاء داخل الأحجار، كما يمكن للفطريات أن تتسبب فــي تلــف الأحجــار الصــلبة

كالجرانيت خاصة النوع المعروف بأسم *Silicatrophic* حيث يقوم هذا النوع بتكوين فطريات بألوان مختلفة علي أسطح هذه الأحجار مؤدية إلي تشويهها.

أما عن الدور المتلف الميكانيكي للفطريات فهو أكثر خطورة حيث ينتج عن العديد من الأنفعالات والضغوط التي تنتج عن طريق نمو الغزل الفطري Mycilum في المسام الحجرية.

* **الطحالب Algae**

توجد أنواع عديدة من الطحالب التي تنمو وتنشط علي أسطح أحجار المنشآت الأثرية ومواد البناء الأخرى، والطحالب عبارة عن نباتات ثالوثية تحتوي علي الكلورفيل وتكون قادرة علي عملية البناء الضوئي وذاتية التغذية عكس البكتريا والفطريات وهي تعيش في بعض البيئات البرية والمياه العذبة والتربة والصخور المرتفعة الرطوبة، والطحالب متعددة الألوان ومن أشهرها الطحالب الخضراء وأهم أنواعها *Chlorella, Pleurococcus* وكذلك الطحالب الخضراء المزرقة وأهم أنواعها *Oscillatoria, Gleocapsa* وتوجد الطحالب في شكل خيوط لزجة أو مسحوق لونه بني أو أحمر أو أخضر أو أزرق طبقا للظروف الجوية المحيطة ومادة الكلورفيل بالإضافة إلي الصبغات الثانوية الأخرى.

ويكمن دور الطحالب في عمليات التلف البيولوجي للأحجار من خلال طرق عدة يمكن تلخيصها فيما يلي:-

- الاحتفاظ أو احتباس الرطوبة داخل مسام الأحجار وكذلك إفرازها للعديد من الأحماض والأنزيمات التي لها القدرة علي تحلل مواد البناء الكربوناتية والسيلسية.

- كذلك يمكن لبعض الأنواع مثـل *Euendolithic* أن تحلـل أسـطح الأحجار إلى أعماق من ٢٥ : ٣٠ ميكروميتر كذلك ينشأ عنها العديد مـن الثقوب والحفر.
- كذلك يمكن الطحلب *Moss* أن ينتج أحماضا تتفاعل مـع الرصـاص والسليكا، ويحتاج طحلب الموس إلي أسطح رطبة خشنة حيـث يمكـن أن تتجمع عليها حبيبات الأتربة والسناج.
- كذلك وبمجرد مهاجمة الطحالب للأسطح الحجرية والمنشـآت الأثريـة فإنها تمتص الرطوبة وتحتفظ بها داخله أو علي أسطح الأحجار مما يرفـع من محتوى الرطوبة للحوائط مما يعمل علي تميؤ الأملاح وهجرتها وإعادة تبلورها في أجزاء أخرى من الحائط.
- كما أن بعض أنواع الطحالب تمد أسطح المنشآت الأثرية بكميات كبيرة من الأمونيا والمواد الطينية اللزجة بواسطة عمليات التحلل البيوكيميـائي. كذلك تتسبب الطحالب في عمليات التغير اللوني لأسطح الأحجـار ومنهـا الرخام حيث تغير سطحه إلي اللون البرتقالي أو اللون الأحمر.
- كذلك تقوم خلايا الطحالب بتصنيع المواد العضوية الغذائية لكـلا مـن الفطريات و الأوشنة عن طريق عمليات التمثيل الضوئي ويمكن للطحالب أن تنمو سواء علي أسطح مواد البناء أو تحت السطح حيث أن عمق التخلل لهذه الكائنات يعتمد أساسا علي تخلل الضوء.

* **الأشنة : Lichen**

تعتبر الأشنة من أكثر العوامل البيولوجية المساهمة في تلـف وتحلـل أحجار المنشآت الأثرية خاصة الأحجار الجيرية حيث يعادل التأثير الناتج عنها

التأثير المباشر لميكانيكية التجوية الملحية والملوثات الجوية الحامضية وتلف التجمد.

والأشنة ناتج إتحاد أنواع معينة من الطحالب والفطريات التي يمكن أن تنشأ علي الأسطح الخارجية الرطبة للأحجار.

وتوجد الأشنة علي أسطح الأحجار في ألوان متعددة منها الرمادي المائل للبرتقالي أو الخضراء المزرقة. وفي الغالب تقوم الأشنة بتكوين طبقات أسفنجية ذات ألوان رمادية أو بيضاء فوق أسطح الأحجار وتتميز هذه الطبقات بمقدرتها علي أمتصاص الرطوبة النسبية أو المياه التي تسربت داخل حوائط المنشآت الأثرية من التربة.

ويمتد نشاط هذه الكائنات أسفل أسطح الأحجار بعدة مليمترات حيث ينتج عن ذلك تلف خطير للأحجار نتيجة للتغيرات الحجمية للأشنة خلال تحولاتها من الحالة الجافة إلي الحالة الرطبة والعكس كما أنها تصبح مصدراً من مصادر الرطوبة.

ويمكن تلخيص عمليات التلف الفيزيائي الناتج عن النشاط الفسيولوجي للأوشنة في عمليات السحق والتنعيم للحبيبات السطحية Pulverization ، عمليات التقشير السطحي للأحجار Exfoliation ، عمليات التبخر والتأكل للأسطح الحجرية Alveolarization & Erosion .

كذلك أثبت العديد من العلماء أن لبعض أنواع من الأشنة القدرة علي إحداث تغيرات كيميائية كبيرة للأحجار وذلك من خلال إفرازها لبعض الأحماض العضوية التي تتفاعل مع العناصر المعدنية الداخلية في تركيب الحجر مما يؤدي إلي حدوث تغيرات تركيبية للطبقات السطحية الرقيقة للأحجار.

تأثير الحشرات والطيور Insects and Birds Effects

وتشمل كل من النمل الأبيض Termites والنحل البــري Wild Bees والوطاويط Bats ، والطيور Birds بالرغم من أن التلف الناتج عــن نشــاط الوطاويط من الأضرار غير المباشرة علي الأثار الحجرية ألا أنها قــد تســبب تشويه لأسطح هذه الجدران خاصة الحاملة للصور الملونة ويتمثل هذا التلف فيما تخلفه من بقع الدم بنية اللون وهي من البقع الصعب إزالتها وعند تنظيفها تحدث تلف أخر نتيجة قوة التصاقها بالأسطح.

ويتمثل دور النمل الأبيض في عمليات التلف التي يحدثها للأثر الحجــري فــي نشاطه الكبير في حفر الأنفاق التي يتخذها مأوى له في التربة أسفل الأساســات وبإنتشار هذه الظاهرة تؤدي إلي خلخلة التربة مما ينتج عنه تصــدع المبــاني والجدران الأثرية القائمة فوق هذه التربة.

أما التأثير الناتج عن النحل البري فهو عبارة عن تلف غير مباشر حيث يقوم ببناء أعشاشه من الطين وإفرازته العضوية والتي تكون غاية في التماسك علي أسطح الجدران المنقوشة في المعابد الموجودة في الأماكن النائية مما يؤدي إلي تشويه هذه الأسطح .

النباتات Plants

وتشمل كل من العشب والشجيرات والأشجار والتي يتمثل دورها فــي حالة نمو هذه النباتات علي أساسات المباني الأثرية أو بالقرب منها حيث تتأثر هذه الأساسات بالإفرازات الحمضية الناتجة عن جذور هذه النباتات حيث تؤدي إلي تأكلها، هذا بالإضافة إلي تكوين المواد الدوبالية نتيجة لعملية الــتعفن التــي تتعرض لها جذور هذه النباتات ونشاط هذه المواد في تراكم الأمــلاح القابلــة للذوبان في بنية الأثر الحجري.

كذلك يلعب العشب البري الذي ينمـو بـين عـرانيس الأحجـار دورا بالغ الخطورة فيما يسببه من ضغوط ناتجة عن نمـو جـذور هـذه النباتـات البرية وما تحدثه هذه الضغوط من شروخ وتشققات، بالإضافة إلـى دور هـذه النباتات في تعطيل عمليات البخر من علي أسطح الأحجار الأثرية مَمـا ينـتج عنها زيادة المحتوى المائي للأثر الحجري والخطورة التي تعقب هـذه الحالـة (صورة رقم ٥٥) . كما قد يتسبب عن نمو العشب البرّي بشـكل واسـع فـي العديد من المناطق الأثرية في حدوث الحرائق التي تؤثر بشـكل مباشـر فـي أنهيار بنية الأثر الحجري كما حدث في معبد موت بمعابد الكرنك بالأقصر .

١٠-الدور البشري المتلف: Man – Made deterioration :

يعتبر التلف البشري من أهم مسببات تلف الأثار الحجرية فـي الوقـت الراهن كما ينتج عنه مشاكل عديدة، وتتمثل عوامل التلف البشري في:

الإتلاف المتعمد:

وينتج هذا التلف عن أعمال الهدم والتخريب التي يقوم بها الأفراد لبعض المعالم الأثرية لرغبتهم في التجديد وذلك بسبب الأهمال والجهل وأنعدام الوعي الرقابي والأثري، كما ظهر هذا التلف عن بعض السكان الفارين فـي عصـور الإضطهاد المسيحي الذين قاموا بالسكن في بعض المعابد القديمة وتغيير ما بها من ملامح أثرية لاعتقادهم بأنها تمثل المظاهر الوثنية حيث قام الـبعض ممـن سكنوا هذه المقابر بمحو الصور الملونة التي تغطي جدرانها وذلك بتغطية أسطح هذه الصور الملونة بطبقة من الغسول الأبيض الجيري وقاموا برسمها بالمناظر المختلفة التي تتفق مع عقيدتهم وميولهم وفي مثل هذه الحالات نجد أن المناظر الفرعونية القديمة قد اختفت أسفل هذه الطبقات الجيريـة الملونـة والمرسـومة بالمناظر المختلفة.

وفي بعض المقابر أكتفى الناس بالسكن دون تغطية سطحها بالطبقة الجيرية السابقة وقد ترتب علي هذا الوضع أن غطيت معظم جدرانها بطبقة من السناج الكربوني الأسود الذي تخلف عن عمليات حرق المواد الكربونية المتصاعد من المواقد المختلفة التي يستخدمها الإنسان في عمليات الطهي أو التدفئة أو غير ذلك من الأنشطة المعتادة في الحياة اليومية التي يمارسها الإنسان.

كما أن بعض ساكني المقابر قد قاموا بهدم كثير من جدرانها الداخلية بما تحمله من صور ومناظر ملونة رغبة منهم في توفير السكن الرحب لهم ولأفراد أسرتهم .... ولا شك أن ظاهرة أتخاذ المقابر للسكن قد شاعت في مصر خلال العصر القبطي وذلك عندما تعرض أقباط مصر للظلم من جانب الحكام الرومان الذين كانوا يضطهدونهم بسبب اختلاف العقيدة ففر أقباط مصر بدينهم بعيدا عن وجه هؤلاء الحكام والولاة وأتخذوا المقابر المصرية القديمة مسكنا لهم وتعتبر مقابر تل العمارنة خير شاهد على هذه الإحداث وغيرها من المقابر والمعابد الفرعونية القائمة في المناطق الصحراوية.

كذلك التلف الناتج عن زوار الأثار الذين تنقصهم الثقافة والوعي بعناصر التراث الأثري حيث يقومون بالكتابات علي الجدران الأثرية بإستخدام الفحم، والطباشير والملونات المختلفة وأحيانا حفر عبارات الذكري علي النقوش الجدارية، كذلك يقومون بتشويه الجدران عن طريق اللمس بالأيدي.

أعمال الترميم الخاطئة Fault works of conservation

أن كثيراً من العناصر داخل المقابر تُعَرضت لعمليات ترميم مختلفة في الماضي نتيجة لما تعرضت له هذه الجدران من عوامل وقـوى تلـف مختلفـة ويمكن القول بأن كثيرا من هذه الأعمال قد تم بطريقة خاطئة لعدة أسباب يمكن تلخيصها علي النحو التالي:

١. قلة كفاءة المرممين وعدم درايتهم بمراحل الترميم المختلفة.

٢. عدم دراسة أسباب التلف وتفسير مظاهرها تفسيرا علميا صحيحا.

٣. عدم التحقق من كفاءة المواد الكيماوية المستخدمة في العلاج والتأكـد مـن عدم وجود أخطاء جانبية تنجم عن استخدامها بعد انتهاء مرلحل العلاج.

٤. استخدام المواد المنظفة والمقوية بطريقة خاطئة وبإعداد خاطئ لا يتناسـب مع طبيعة النقوش الجدارية وحالة التلف التي تقدمها.

ويمكن القول بأن أعمال الترميم التي أجريت في الماضي لكثيـر مـن الآثار لم تتم علي أسس عملية سليمة بل كان يقصد بها تجميل الآثر لكي يبـرز سطحه الخارجي في أجمل صورة تسر المشاهدين – وعلى هذا الأساس استخدم المرممون القدماء مواد مختلفة تحقق لهم الغرض السابق – فقد كـانوا يطلـون أسطح الصور الجدارية الملونة بطبقة من الورنيش الزيتـي أو الشـمعي لكـي تعطي سطحا لامعا للصور الجدارية وبمرور الزمن تحولت طبقة الورنيش إلي طبقات متلفة للاثر بعد أن تحول لونها إلي طبقة سوداء وقد تراكم فوقها الأتربة والايروزولات المتطايرة في الجو كما حدث في لوحة الحلم الجرانيتية أما تمثال أبو الهول .

كما استخدم المرممون بعض المذيبات لتنظيف أسطح الجدران الأثريـة من الأتربة والمواد التالفة بطريقة خاطئة أدت إلى تلـف الزخـارف والألـوان

وذوبان المواد الرابطة لها وفي بعض الحالات التي استخدام فيهـا المرممـون المواد الكيماوية المقوية لمكونات الجدران فقد استخدامت بنسب تركيـز عاليـة حالت دون تسربها إلى أعماق هذه المكونات ولهذا السبب كونت هـذه المـواد طبقة عازلة إما فوق سطح الجدران الآثرية أو أسفل هذه الأسطح والتي يصعب إزالتها بعد العلاج.

ومن أمثلة المواد الكيمائية التي أستخدمت بنسب تركيـز عاليـة فـي الماضي لتقوية الأحجار الآثرية (البارالويد – مركبـات الفينـول – السـليكات القلوية).

وبالإضافة إلي ماسبق ذكره فأنه في بعض الحالات التي تطلبت استخدام مواد التقوية للجدران داخل المقابر الآثرية استخدم بعض المرممون الأسـمنت الذي يحتوي علي نسب عالية من أمـلاح الكبريتـات والكلوريـدات المتلفـة واستخدموا مونات الجير والرمل والجبس، ولكن بنسـب غيـر سـليمة لسـد الفراغات والشقوق لذلك نجد أن معظم هذه المواد تعرضت للتشقق والانفصـال عن الشقوق كذلك إستخدمت بارات الحديد وشيك الحديد القابل للصدأ في عمليات تجميع و استكمال الآثار الحجرية مما نتج عنه ضغوط على الأحجار والمونـة نتيجة الزيادة في أحجام البارات نتيجة الصدأ المتكون (صورة رقم ٦٧).

١١ – تأثير الزلازل Earthquakes Effects

تعد الزلازل من أهم الكوارث الطبيعية التي تسـبب أثـارا تدميريـة للتـراث الحضاري في كافة أنحاء العالم.

وقد تعرضت مصر للعديد من الزلازل سواء التاريخية أو الحديثة ومن أشهرها زلزال أبو سمبل ٢٢٠٠ ق.م وطيبـة ٦٠٠ ق.م والبردويـل ٢٠ ق.م والفسطاط ٨٨٥ ق.م والأسكندرية ٩٥١م، ١٢٣٦م وأخيرا زلزال أكتوبر ١٩٩٢

الذي خلف العديد من مظاهر الدمار للمباني الأثرية خاصة الأثـــار الإســـلامية بمدينة القاهرة بالإضافة للدمار الذي أصاب بعض الأثار الفرعونية مثل معبـــد هيبس بالواحات الخارجة والسؤال هو إذا كانت الأثار المصرية القديمة والأثار الأسلامية قد تعرضت للعديد من الزلازل التي تضاهي أو تزيد في قوتها مـــن زلزال اكتوبر ١٩٩٢م فلماذا إستطاعت مقاومة تلك الزلازل ولم تستطع الصمود أمام الزلزال الأخير علي الرغم من أنه زلزال متوسط القـــوي قـــدر بـــــ ٥,٣ بمقياس ريختر ويرجع ذلك لضعف مقاومة المباني الأثرية في هذه الفترة التـــي نعيشها وذلك نتيجة لما واجهته طوال تاريخها من عوامل متلفة وما تواجهه الأن من عوامل مدمرة تضعف من كفائتها وقدرتها علي المقاومة.

وقد تم تعريف الزلزال علي أنه تكسر وتغلف مفاجئ لكتل وأحجام هائلة في الطبقات الصخرية الأرضية بسبب إجهادها إلى حدود تفوق قابليـــة تحملهـــا للقوى التكتونيه المسلطة عليها داخل الغلاف الصخري حيث تتحرر إثـــر ذلـــك طاقة حركية ضخمة جداً تنطلق معظمها علي هيئة إهتزازات تنطلق في بـــاطن الأرض وعلي سطحها مسببة الكوارث والدمار.

والزلازل الأرضية عبارة عن سلسلة من الموجات المرنة التـــي تولـــد فجأة في قشرة الكرة الأرضية وفي مناطق واسعة منها بسبب وجـــود تشـــققات وصدوع فيها تؤدي بدورها إلى حدوث إحتكاكات في الأجسام الصخرية بعضها ببعض مما يولد هزات موجبة مختلفة السرعة والإتجاه.

ومنبع الزلزال:

هو الحيز المحدود تحت سطح الأرض الذي حدث فيه تغير الأنفعـــال ، وتصنف الزلازل طبقا لطبيعة منابعها إلى زلازل انفجاريـــة صـــناعية وزلازل بركانية تكتونية، وبؤرة الزلزال هي ذلك المكان تحت سطح الأرض الذي تنطلق

من الهزة الأرضية **أما المركز السطحي** فهو النقطة علي سطح الأرض والتي تعلو البؤرة وتكون قوة الزلزال فيها أشد ما يمكن، **وقوة الزلزال** هي تعبير رقمي وضعه العالم الألماني ريختر ١٩٣٥م وقسمها إلي درجات من ١ : ٨ لتعبر عن الطاقة المطلقة أو الكلية للزلزال والتي يمكن تسجيلها وتكون ثابتة لجميع المحطات، **أما شدة الزلزال فهي** تعبير وصفي عن تأثير الزلزال في مكان معلوم وعلي أساسها تضف الخسائر ومظاهر التلف الناجمة عن الزلزال.

ويصدر عن الزلزال عدة موجات تسمى الموجات الزلزالية مثل الموجات الصوتية التي تنقسم بدورها إلى موجات رئيسية طولية وموجات ثانوية أو مستعرضة.

ويسبق الزلزال الرئيسي بهزة متقدمة أقل منه في الشدة تسمى صدر الزلزال ثم تحدث الهزة الرئيسية وبعدها يتوالى حدوث هزات أقل في الشدة تسمى توابع الزلزال وأحيانا يحدث إطلاق تدريجي للطاقة المختزنة علي شكل زلزال ضعيف دون حدوث صدمة رئيسية تسمى العواصف الزلزالية ، هذا وترتبط الأضرار الناشئة عن الزلازل بمقدار الطاقة المتحررة عنها والمنطلقة في شكل موجات اهتزازية وتختلف الأثار الناتجة بإختلاف شدة الزلزال وعمقة البؤري. وطبيعة المنطقة وتكوينها التكتوني والجيولوجي الذي يمكن أن يؤدي إلى تضخيم اهتزاز التربة إذا كانت طبيعتها رمدية أو رملية أو إلى تخميد الأهتزاز إذا كانت صخرية كذلك تؤثر أشكال المنشأت وخواصها الإنشائية علي مقدار الضرر الواقع عليها من جراء الأحمال الزلزالية.

ومن أهم الأضرار الرئيسية الناشئة عن الزلازل على المنشآت الأثرية ما يلي:

- تداعى الأبنية: يؤدي إهتزاز المنشآت بفعل الزلازل إلى تطبيق قوى متلفة في مختلف عناصرها تؤدي لتوليد اجهادات في مختلف عناصر المبنى فيحدث له إنهيار جزئي أو كلي نتيجة عدم قدرة عناصره على مقاومة الاجهادات المتولدة عن قوى الزلازل .
- حدوث إنهيارات رأسية أو أفقية: وذلك نتيجة الحركة النسبية للصفائح التكتونية في المنطقة المنكوبة.
- حدوث إنهيارات وتشققات أرضية.
- فقدان التربة لقوة التحمل: حيث تتصرف التربة كالسائل اللزج وتفقد قدرتها على التحمل مما يلحق أضراراً بالغة بالأبنية المستنده عليها .
- كما يحدث أن تتجذب الحوائط بعيدا عن بعضها خلال فترة الأهتزاز مما يؤدي إلى الغاء قوي الضغط التي تمسك العقود والقبوات في المنشآت الأثرية وينتج عن ذلك شروخ طولية أو تشوهات أو انبعاجات أو انهيارات، كما يختل اتزان المأذن نتيجة لتأرجح الجدران الحاملة لها يمينا ويسارا أو يؤدي ذلك لميلها او سقوطها.

وعامة يؤدي حدوث الزلزال إلى وجود العديد من الأتلافات والأضرار التي قد تحول الأماكن الأثرية إلى خرائب وأطلال كما قد يتوافر لها من القوة والشدة مما تؤدي إلي تهدم البناء كله وفي بعض الأحيان تساقط بعض من أجزاءه.

أهم التقنيات العلمية المستخدمة في علاج وصيانة الآثار الحجرية

تختلف طرق علاج وصيانة الآثار الحجرية طبقا لظروف وطبيعة ونوع الأحجار المكونة للأثر، فصيانة وعلاج الآثار الحجرية المعروضة في المتاحف تختلف عن مثيلاتها المكشوفة والموجودة في أماكن مفتوحة مثل التماثيل أو المباني الأثرية الثابتة، وآيا كانت شكل المعالجة التي تتبع في المحافظة علي الأثر الحجري فإن القاعدة تسير علي خطوات محددة تتمثل في إعطاء وصف تفصيلي موضح عن حالة الأثر كتحديد أصل مكونات تلك الأحجار وأنواعها ومصادرها وكذلك العصر التاريخي الذي ينتمي له الأثر وأهم الزخارف الذي يشتمل عليها، كما يتم تعيين الخواص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية لمادة الحجر، الي جانب تحديد كمية الشروخ. وحجمها وتوزيعها ووضع رسومات توضيحية لها كلما أمكن ذلك.

كما يتم وضع دراسة شاملة للعوامل البيئية المحيطة بالأثر مثل المياه الجوفية، الأملاح في التربة المحيطة ونوعيتها، التذبذب في المستوى المائي للتربة المحيطة، دراسة لدرجات الحرارة والرطوبة ليلا ونهارا ومدى اختلافها في فصول السنة المتعاقبة، التلوث الجوى وأهم عناصره،موقع الأثر من حيث تعرضه لأشعة الشمس المباشرة وأتجاه الريح والعواصف الرملية، هذا بالإضافة إلى تأثير الاهتزازات الناتجة عن طرق المرور المتاخمة.

كما أن معرفة الغرض من إقامة الأثر الحجري واستخداماته في الماضي بجانب دراسة حالته والعوامل البيئية المحيطة تعطي القائمتين بأعمال الصيانة فكرة واضحة عن عوامل التلف التي يري أن لها تأثيرا علي الأثر الحجري ومدى أصابته وبالتالي إقتراح الطرق التي يمكن أن تتبع والمواد التي تستخدم في عملية العلاج.

كما تراعى عمليات التسجيل الكامل والتدوين الدقيق أثناء مراحل العمل ومقارنتها بعمليات التسجيل التي تمت قبل الشروع في العمل بحيث لايترتب علي عملية الصيانة تغيير للمعالم الأثرية أو طمسها ويراعى أن يكون التدخل في أضيق الحدود وعند الضرورة القصوى لأتمام مراحل العلاج.

وغالبا ما يتم البدء في عمليات الصيانة بالقيام بالعديد من الفحوص والتحاليل بهدف التعرف علي كل ما سبق في شكل علمي مبرهن بأساليب علمية وذلك من خلال إستخدام طرق الفحص والتحليل سابقة الذكر .

وغالبا ما تبدأ أعمال الصيانة للأثار والحجرية بأعمال التنظيف الميكانيكي أو الكيميائي أو إزالة الأملاح – ولكن يجب أولا التأكد من أن حالة الحجر تسمح بذلك وبدون أن تتسبب هذه الأعمال في تساقط الأسطح المنقوشة أو إزالة طبقة اللون ففي مثل هذه الحالات يتم البدء بعمليات التقوية والمبدئية يعقبها عمليات التنظيف أي أن أعمال الترميم وبدايتها يكون المتحكم فيها حالة الأثر وخبرة المرمم.

أولا عمليات التنظيف : Cleaning

وتبدأ أولي مراحل العلاج بعمليات التنظيف المختلفة حيث يعتبر التنظيف من الوسائل السهلة الفعالة للمحافظة علي الأثار الحجرية ويشترط في هذه المرحلة أن تتوفر للقائم بأعمال الصيانة الخبرة اللازمة والمهارة الشخصية وأنتقاء الطريقة المثلي في التطبيق مع دراسة نوعية وظروف السطح الذي سيتم تنظيفه، وترجع هذه الشروط إلي أن الظروف المعاكسة لها تؤدي إلى نتائج بالغة الخطورة.

* مفهوم التنظيف Cleaning

يعتبر التنظيف من العمليات التي تلعب دورا هاما فـــي إعـــادة الأثـــار الحجرية إلي رونقها وبهائها حيث يتم استخدام مختلف المواد والطرق من أجل إزالة الاتساخات والأتربة والمواد الغريبة عن مادة الأثر الحجري التي تقلل من جاذبية وجمال مادة الحجر الطبيعية مع مراعاة أن لا تغير هذه المواد والطـــرق المستخدمة في التنظيف من الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكيـــة للأثـــر الحجري ولذا فقبل القيام بعملية التنظيف يجب التعرف علي مـــواد الاتســـاخات وطبيعتها وخواصها الكيميائية لمعرفة أفضل الطرق والمواد الصالحة لأزالتهـــا بدون التأثير علي مادة الأثر وقيمته الفنية والجمالية وهو مـــا ســـيتم توضـــيحه كالأتي:

* طبيعة الأتساخات: The Natural of Dirt

تعرف الأتساخات علي انها مواد موضوعة في موضع خـــاطئ ومـــن أمثلتها الأتربة والسناج والمعلقات الهوائية وهذه المواد الغريبة عن مادة الأثـــر الأصلي إما مواد ناتجة عن تعلقها أو ترسبها علي الأثر الحجري والتصقت بـــه مثل الدخان والأتربة والصبغات.... ألخ أو عبارة عن مواد نتجت عن تفاعـــل المواد الغريبة عن الأثر الحجري مع مادة الأثر نفسها، أو نتجت عن مادة الأثر نفسها نتيجة لتغير الظروف المحيطة ومن أمثلتها الأملاح المختلفة مثل أمـــلاح الكبريتات والكلوريدات وغيرها.

وتلتصق هذه الإتساخات علي سطح الأثر ميكانيكيا مثل تداخل حبيبـــات الأتربة في الحفر الميكروسكوبية الموجودة علي سطح الحجر الأصـــلي مثـــل الأملاح الموجودة علي السطح والمتداخلة فيه، أو قد تكون مرتبطة كيميائيا مع السطح مثل الأملاح الجبسية أو الكربوناتية الناتجة من التفاعل التبادلي بين البيئة

المحيطة وأسطح الأحجار أو قد تمسك على السطح بواسطة الجذب الألكتروستاتيكي (التبادل الأيوني) وقبل البدء في إزالة هذه المواد الشوهة لجمال الحجر يجب معرفة الخواص الفيزيائية والكيميائية للمواد المستخدمة في التنظيف والترميم ومدى نجاح الطرق المستخدمة في تحقيق أغراض التنظيف لذا يجب أن تتوافر في المواد والطرق المستخدمة المميزات الآتية:-

١. يجب أن لا تكون ذات تأثير فيزيائي او كيميائي علي مادة الحجر.

٢. أن تزيل مواد الأتساخات دون إزالة مادة الأثر الحجري الأصلي.

٣. أن لا تؤدي إلي مزيد من الأتساخات للأثر الحجري.

٤. أن لا تؤثر علي صحة المرمم وتكون منخفضة التكاليف بقدر الإمكان.

* أساليب التنظيف : **Cleaning Techniques**

وهي الأساليب التي تتبع لإزالة الأتربة والأتساخات السطحية وغيرها من المواد التي تضر الأثر الحجري وتشتمل علي الأساليب الميكانيكية والكيميائية الآتية:-

أ - التنظيف الميكانيكي : Mechanical Cleaning

وهذا النوع من التنظيف يعمل علي كسر الأتصال بين الأتربة وبين الأثر بدون التأثير علي الأثر نفسه ومن مميزاته أنه لا يضيف أي مواد قد تتلف الأثر نفسه مثل المذيبات التي قد تحمل الأتربة والأتساخات إلي داخل مسام الحجر أو مواد كيميائية ربما تتفاعل مع الأثر وتتلفه أو أنها قد تضر المرمم نفسه. وتبدأ عمليات إزالة طبقات الأتربة والأتساخات من علي السطح أما يدويا بإستخدام الأدوات البسيطة المختلفة كالفرش بنوعيها الخشن والناعم والفرر والأزاميل أو آليا بإستخدام ماكينات الإزالة التي تحمل رؤس الكربورانـدم

المخروطية الشكل. ويمكن إجراء عمليات التنظيف الميكانيكي أيضا باستخدام ماكينات قذف الحبيبات الجافة Dry-Gril Blasting المقترنة بالهواء المضغوط Compressed Air علي سطح الأثر المتسخ والبودرة المستخدمة كمادة حكاكة تكون كربونات الكالسيوم والماغنسيوم، وبيكربونات الصوديوم، وخرز زجاجي أو أكسيد الألومنيوم وبودرة كربيد السليكون وهي تتفاوت في صلابتها من كربيد السليكون (صلب) إلي بيكربونات الصوديوم (ناعم) وذلك لتعدد استخداماتها علي حسب نوعية الأستخدام ومواد الإتساخات الموجودة علي الآثر، وتقذف هذه الحبيبات من خرطوم يبرز من ماكينة قذف هذه الحبيبات والتي تعتمد علي الهواء أو بعض الغازات الأخرى مثل النيتروجين أو ثاني أكسيد الكربون في عملية القذف .

ويجب قبل الأقدام علي هذه العملية معرفة درجة الصلابة المطلوبة للمواد الحكاكة المقذوفة ونوعها وشكلها ومعدل الضغط، حيث يتوقف نجاح هذه العملية على سرعة الحبيبات المتدفقة منها الحبيبات الحكاكة . لذلك يجب أن تتوفر للقائم بأعمال الصيانة بهذه الآلات والأدوات الميكانيكية الخبرة اللازمة والمهارة الشخصية والألمام بطبيعة وحساسية الأسطح الأثرية التي يقوم بتنظيفها حيث أن هذه الطريقة لاتستخدم إلا في حالة الأسطح الحجرية التي تتميز بالصلادة والكثبات والتي يعلوها طبقات صلدة من الأتساخات والأملاح المتكتلة حيث تستخدم المواد الحكاكة الدائرية إذا كانت طبقة الإتساخات متصلبة، كما يجب توفر معدل الأمان للعاملين من خلال استخدام القفازات والملابس الواقية.

كما يجب الإحتياط أثناء تنفيذ هذه الطريقة والتوقف عن التنظيف إذا ثبت تلف السطح بها ولا يجب الإسراع بالعمل أو الإندفاع فيه خاصة في الأسطح المسطحة، وسواء كان التنظيف بالمواد الحكاكة قد نفذ جافا أو مبتلا

فيجب استخدام خرطوم مياه لإزالة بقايا الأتربة والمواد الحاكة، وفي الأماكن الصغيرة يمكن استخدام رشاشات اليد.

• **التنظيف بالمذيبات العضوية Organic Solvents**

يلي عمليات التنظيف الميكانيكي إستخدام المذيبات العضوية في التنظيف وذلك لإزالة البقع العالقة بأسطح الأحجار الأثرية والتي فشلت معها طرق التنظيف الميكانيكي ويراعي في هذه الحالات تقوية الأسطح الهشية قبل القيام بعمليات التنظيف كما يراعي عمل الإختبارات اللازمة في حالة الأسطح الملونة بالأرضيات وتستخدم لمذيبات العضوية في إزالة البقع بشكل موضعي حيث تتميز هذه المذيبات بقدرة كبيرة على إزالة العديد من البقع الناتجة عن مخلفات الطيور والكائنات الدقيقة والبقع الدهنية والدم والسناج وغيرها من البقع التي تشوه الأسطح الأثرية . هذا بالاضافة إلي سرعة تطاير هذه المذنيبات ويعتمد الأساس العلمي لاستخدام هذه المذيبات على إذابة الإتساخات في المراحل الأولية في الإنتفاخ والتحول إلي مادة هلامية Gel ثم الإذابة .

ويشترط عند إستخدام المذيبات العضوية أن تتخذ الإجراءات الأمنية التي توفر الوقاية للقائمين بأعمال الصيانة وكذلك الأثر لما لهذه المواد من خطورة فهي سريعة الاشتعال بالإضافة إلي سميتها ومن المذيبات المستخدمة في عمليات التنظيف زيت التربنتينا المعدني ، بنزين ، طولوين ، زايلين كتيرين ، الكحول الايثيلي ، كحول ميثيلي ، اسيتون ، تراي كلوروايثيلين ، رابع كلوريد الكربون ، بيريدين ، ايثيل إيثرو يفضل إستخدام خليط من هذه المذيبات بنسب متفاوتة أو متساوية حسب قوة إلتصاق البقع بالسطح حيث أن خليط المذيبات يعتبر أكثر فاعلية كما أنه ينظم عملية البخر .

ب – التنظيف الكيميائي : Chemical Cleaning

يلي التنظيف الميكـانيكي التنظيـف الكيميـائي وذلـك إذا لـم تفلـح الطرق اليدوية أو الميكانيكية الآلية في إزالة الأتربـة والإتسـاخات السـطحية ولا نلجأ إلي التنظيف الكيمائي إلات في حالات الضـرورة القصـوي وبأقـل تركيز ممكن ويعتمد هـذا الأسـلوب علـى كسـر الـروابط الأوليـة لتلـك الأتساخات وبالتالي تصبح سهلة الأزالة من على السطح حيث تستخدم مختلـف المذيبات والمواد الكيميائية ويطلق على هذا الأسلوب التنظيف الكيميائي الرطب Wet Chemical Cleaning لإزالة بقايا الأتساخات صعبة ازالة ويجـب أن يتم استخدام المواد والطرق بمنتهى الدقة والحذر وفي أضيق الحـدود الممكنـة حتى لا نعرض الأثر الحجري للتلف ، وتعتمد عمليات التنظيف الكيميائي علي:

١. المحاليل الحمضية والقلوية: Acid and Alkaline Solutions

وتعتبر المحاليل الحمضية والقلوية القوية من الطـرق غيـر المناسـبة والخطرة علي الآثار الحجرية وذلك لتأثر مادتها بهما. ولكن يتم استخدامهما في ظروف خاصة مع الحرص والحذر الشديدين ومن بين الأحماض القوية حمض الهيدروفلوريك HF وهو من المواد الرخيصة وهو يذيب بسهولة القشرة الصلبة الكلسية ولكنه خطر جدا إذا لامس سطح الحجر وتسـتخدم أيضـا الأحمـاض الضعيفة في عمليات التنظيف مثل حمض الخليك والفورميك وأحيانـا يسـتخدم حمض الهيدروكلوريك بنسبة تركيز ضعيفة جدا وبشكل موضعي وبعدها مباشرة يتعادل السطح ويغسل جيدا بالماء المقطر ثم الكحول الذي يساعد على سـرعة جفاف السطح ، وتستخدم المحاليل القلوية القوية مثل هيدروكسـيد الكالسـيوم NaOH والتي يتبع علاجها بحمض الهيدروكلوريك لمعادلة الحمض بالقلوي ثم يتبعها الغسيل بالماء ونظرا لتأثير هذه المواد القلوية القوية والأحمـاض علـي سطح الحجر مباشرة لذلك يجب عدم آستخدامها في إزالـة طبقـات الاتسـاخ

للأحجار الأثرية إلا إذا كانت هذه الطبقات سميكة وفي وضع لا يسمح بملامسة هذه المواد الخطرة لسطح الحجر مباشرة والتوقف عن استخدامها عند ملامستها للسطح الحجري واستخدام الطرق الأخرى الآمنة في إزالة بقايا هذه الطبقة من علي السطح الحجري.

كما تستخدم القلويات الضعيفة أيضا في عمليات التنظيف والتي إذا إستخدمت في غياب الماء فإن دورها لا يتعدي كونها مذيبا للمواد الدهنية مثل إستخدام محلول ثيوكبريتات الصوديوم $Na_2SO_3.5H_2O$ ، كربونات الأمونيوم $NH_4.2CO_3$ ، أمينات الأمونيوم .

٢. عجائن المذيبات الجيلاتينية : **Gelatinous Solvent Pastes**

وهي تحضر بإضافة عامل جيل Thixotropic إلي محلول قلوي ضعيف للحصول علي عجينة وهذه العجينة تفرد علي الأسطح العمودية والأسقف ويبقي المحلول في اتصال مع الحجر، وللأحتفاظ بها رطبة خلال وقت التطبيق تغطي العجينة بفليم بلاستيكي خفيف ومن أهم العجائن الشائعة عجينة : AB57 والتي وضعت بواسطة Mora من مركز الترميم في روما وتتركب كالآتي:

Water	1000 mL
Ammonium Bicarbonate	50 gr
Sodium Bicarbonate	50 gr
Sodium Hydroxid	25 gr
Disodium Salt of Ethylene Diamino titra acetic Acid	
Desogen (Ammonium Quatenay Salt)	100 mL
Carboxy Methyl Cellulose (C.M.C)	50 gr
Triethanolamin	100 mL

وتتم إذابة هذه المكونات في لتر ماء وتكون قيمة PH للمحلــول ٧,٥ وهذه الكمادة ذات قوام جيلاتيني نقي وتطبق على الأسطح المراد تنظيفها بعــد ترطيبها بالماء عن طريق فرشاة ثم تغطي في الحال بواسطة طبقة رقيقة مــن البولي إيثيلين لمدة ٢٤ ساعة ومن الممكن تكرارها أكثر من مرة ، وبعد عملية التنظيف يتم إزالة مكونات الكمادة من على السطح بالشطف بالماء النقــي ثــم يجفف ، ومن مميزات هذه الكمادة أنها آمنــة كيميائيــا . وتعمــل الكربونــات والبيكربونات علي تسهيل عملية التنظيف وإذابة الأملاح مثل الجبس.

ويعمل (Desogen) كمخفض للتــوتر الســطحي ومطهــر ومبيــد للجراثيم، ويتصرف كربوكسي ميثيل سليولوز كعامل جيل Thixotropic وفعل عجينة AB57 يكون مؤثر خاصة علي القشرة السوداء الغنية بالجبس .

كما يمكن استخدام كمادة Grissom فــي تنظيــف طبقــات الغبــار والتكلسات الترابين وتتكون من :-

وزن ميثيل السليولوز	٧,٥ %
وزن بروبلين جليكول	٥ %
وزن سليكا غروية	١,٥ %
وزن صابون غير أيوني	١ %
وزن تراي إيثانول أمين	١ %

وتخلط هذه المواد جيدا مع الماء المقطر الســاخن عنــد ٨٠ : ٩٠° م وتكون قيمة PH لهذا المخلوط ما بين ٨ : ٩ ، كما يمكن تغيــر هــذه النســب المذكورة طبقا لظروف العمل ، هذا فضلا عن إزالة البقع الدهنية بإضافة بعض

المذيبات العضوية لمكونات الكمادة ، كما يمكن إذابة محتويات الكمادة في الطولوين بدلا من الماء لحساسية الأحجار الملونة .

٣. طرق معتمدة علي الماء : Water Based Methods

ويعتبر الماء من المذيبات الفعالة ويرجع ذلك إلي العزم القطبي الكبير High Polar Momentum لجزيئاته حيث يقوم بإزابة العديد من المركبات غير العضوية المترسبة على أسطح الأحجار الأثرية هذا فضلا عن قدرته على إزاحة العوالق السطحية غير القابلة للذوبان .

وتكون هذه الطرق مؤثرة جدا إذا كانت الأتربة والاتساخات المراد إزالتها تحتوي علي مواد قابلة للذوبان في الماء وأهم هذه الطرق طريقة الغمر والتي تنفذ في حالة الآثار الحجرية الصغيرة والقوية ويستعمل فيها الماء المقطر وذلك لإزالة الإتساخات ولكن من عيوبها أن هذه الإتساخات قد يساعدها الماء في التغلغل داخل مسام الحجر، كما أنه في حالة الآثار الحجرية الضعيفة يعمل رش الماء تحت ضغط عالي أو ضغط منخفض إلي فعل ميكانيكي يؤدي إلي نزع القشور من سطح الحجر وبالرغم من ذلك يعتبر الماء من أهم السوائل المنظفة وذلك لرخصه وسهولة تطبيقه بدون مخاطر وخواص الشد السطحي له ومقدرته علي إذابة المركبات الأيونية.

٤. استخدام الصابون والمنظفات : Use of Soaps and Detergents

ويمكن استخدام محلول مائي مخفف مع صابون ذو جودة عالية ومحضر في أواني زجاجية ولا يسمح مطلقا أن تكون في أتصال مباشر مع الحجر. وذلك لتنظيف الأحجار المتسخة ويجب أن تنظف المناطق في أجزاء صغيرة وذلك حتى لا تسمح للماء المتسخ أن يظل فترة طويلة في تجاويف النقوش ، وبعد التنظيف يمسح الجزء المنظف بواسطة قطعة قماش نظيفة

وناعمة وذلك قبل الأنتقال إلي منطقة أخرى ثم يغسل الحجر كله بالماء حتى تزال آثار الصابون وفي حالة إذا كانت عمليات التنظيف غير قياسية والأتربة زائدة فأنه يمكن استخدام منظف مثل lissapol N و Teepol X. عند تركيز ٦٠ جم في ٥ لترات ماء ويستخدم الماء المقطر كما في الحالة السابقة لإزالة آثاره.

ويوجد أنواع من الأحجار مثل الرخام الأبيض سهل التشويه والتغير اللوني ولذلك فلابد من الأخذ في الإعتبار عدم استخدام الصابون الملون أو الأقمشة أو حتى الجرادل الصدئة ، والمنظفات المسحوقية لابد من تجنبها وذلك لرواسبها المكونة لأملاح الصوديوم التي تنشأ خاصة في أماكن الربط بعد تطبيقات كثيرة ويمكن استخدام صابون من نوع Methyl Cyclothexyloleate في الماء مع الكحول الأبيض أو التراى كلوروإيثلين والقادر على إزالة معدل واسع من الأتربة والإتساخات وله قدرة جيدة علي التغلغل في التشققات الدقيقة والشروخ. وهذا الصابون لا يملك رغوة ويظل نشط عند وجوده علي السطح عادة حوالي ٥ دقائق وبعد التنظيف يجب الغسيل بالماء لإزالة كل آثار الصابون، والنسبة الملائمة تتراوح من ٣ – ٩ أجزاء من الماء والكحول إلي أجزاء من الصابون ثم ينظف مكانه بالكحول ثم بالماء. كما أن استخدام الكحول الأبيض مع Liminent of Soap والأمونيا وعجينة الشمع تعطي نتائج جيدة في التنظيف .

٥. التنظيف بالبخار : **Steam Cleaning**

التنظيف بالبخار يستخدم لتنظيف التماثيل الحجرية حيث يعمل ضغط البخار المتحكم فيه علي طرد الأتربة وقد صنعت الألة أولا لتعقيم وتنظيف أدوات أطباء الأسنان ثم تم استخدامها في مجال الترميم ويستخدم في حالة الأسطح القوية أما الأسطح المفككة فيضرها هذا النوع من التنظيف ويتم

التنظيف بالبخار تحت ضغط من Atm 5-10 (وحدة قياس الضغط الجــوي) وتستخدم نفس الطريقة عند تنفيذ التنظيف بالبخار في حالة التماثيل الحجرية.

ومن الطرق الأخرى للتنظيف اســتخدام **الموجــات فــوق الصــوتية** Ultrasonic Waves وهي عبارة عن أداة خاصة مزودة بساق ينــدفع منهــا موجات فوق صوتية بقوة ٢٢ : ٤٤ كيلو هرتز حيث تؤدي إلي تفكك العوالــق والتكلسات الموجودة علي السطح فيمكن إزالتها و يجب أن تستخدم هذه الطريقة بحرص وعناية شديدة.

كما يمكن استخدام **أشعة الليزر** في عمليات التنظيف حيث ينظر إلــي الليزر على أنه البديل الواعد للعديد من أساليب التنظيف التقليدية خاصة في حالة الواجهات الحجرية والعناصر المعمارية الرخامية والتماثيل ، فإن سنوات مــن الخبرة والتجارب المعملية إعتمدت هذه العملية وأكدت نجاحها ويعتمد التنظيف بالليزر إلي حد كبير على ظاهرة التحكم Controlling Phenomena والتــي تفوق الإدراك الحسي .

ويعتبر ليزر الياغ Yag Laser من أفضل أنــواع ليــزرات المــواد الصلبة التي إستخدمت عدة سنوات في مجال الترميم وذلك للأســباب الآتيــة : تكلفتها قليلة نسبيا ، كفاءتها عالية ، إمكانية تعديل مستويات الطاقة .

وبصفة عامة يستخدم المرممين نبضات الليزر LASER Pulses حيث ينبعث الضوء في شكل ومضات قصيرة والتي يمكن التحكم فيها بسهولة حيــث يتكون كل طلقة من النبضات من كميات محددة متكررة من الطاقة المســتخدمة في عمليات التنظيف ويمكن قياس هذه الكميات من الطاقة .

وبصفة عامة تتميز طريقة التنظيف بالليزر بالدقة والفاعلية الكبيرة حيث يمكن بواسطتها إزالة الاتساخات من على الأسطح الهشة بأمان وبسرعة كبيــرة

وتعتمد فكرة التنظيف بالليزر على حرق التكلسات السطحية السوداء وتفجيرهـا بفعل الحرارة العالية الناتجة عن امتصاص الشعاع المنبعث بعد الإحتراق الكامل للقشرة الصلبة وبالتالي لا يحدث أي امتصاص علي سطح الأثر مما لايسبب له أي خسائر حتى مع تكرار التطبيق علي نفس المنطقة وهذه الطريقـة مأمونـة الجانب في حالة الأسطح الملونة حيث أن التنظيف بالليزر يصل إلى السطح في صورة ضوء دون وجود اتصال ميكانيكي مع السطح مما يؤدي إلي المحافظـة عليه، ولكن هذه الطريقة لا تزال تحت الدراسة والتجريب حيـث عـدم كفايـة الأبحاث العلمية المتكاملة والمتخصصة في تصميم الأنواع المختلفة من أجهـزة الليرز وآليات عملها التي من خلالها تستأهل أو تزال المواد الغريبة ، بالاضافة إلي تعقيدا أنظمة الليزر والحالة الأقتصادية في عالم الترميم تجعل هذه الطريقة بعيدة الاحتمال في الاستخدام .

٦. طرق استخلاص الأملاح : Methods of Salts Extraction

تلعب الأملاح القابلة للذوبان في الماء دورا هاما وخطيرا في تلف الأثار الحجرية سواء عند تواجدها علي السطح الخارجي أو علي مقربة منه أو عندما توجد علي مسافات بعيدة داخل البنية الأساسية لتركيب الحجر مما قد يؤدي إلي انهيار بنية الأثر علي المدى الزمني البعيد نتيجة لعمليـات التبلـور والإذابـة المتكررة بسبب تذبذب المحتوى المائي داخل وخارج الأثر، الأمر الذي استرعى انتباه العاملين في حقل صيانة الأثار لأيجاد الحلول العلمية والتطبيقية لحل هـذه المشاكل من خلال توظيف نفس القوي المتسببة في تراكم الأملاح لاسـتخدامها في عمليات الاستخلاص نفسها وتتمثل هذه القـوى فـي الخاصـية الشـعرية Capillarity وخاصية الأنتشار Diffusion والعملية الكهروكيميائيـة التـي تحدث داخل بنية الحجر (خاصية الجذب الكهربي – الخاصية الكهروسـموزية) ولقد أعطى العلماء تصورا عاما لطرق استخلاص الأملاح التي يجب إتباعهـا

والتي تعتمد علي نوعية الأثر الحجري وظروف تواجده هذا إلي جانب نوع الملح المتراكم ومصدره وتوزيعه داخل بنية الحجر، كذلك مظهر التلف الذي قد يتراوح ما بين حالة التردي الكامل للأثر والحالات التي تحتفظ بتماسكها.

وتبدأ أولى مراحل استخلاص الأملاح بالأزالة الجافة للبلورات الهشة من علي الأسطح الحجرية المتماسكة حيث تزال ميكانيكيا بإستخدام العدد والأدوات البسيطة كالمشارط و الفرر كما تستخدم الطرق الميكانيكية الآلية في حالة تصلد البلورات الملحية علي الأسطح الحجرية.

ويكتفي بالإزالة الجافة للأملاح في حالة توازن الآثار الحجرية مع البيئة المحيطة مع ضمان ثبات هذا التوازن علي المدى الزمنى البعيد، حيث تلعب الأملاح دورا هاما كمادة رابطة لحبيبات المعادن الأساسية المكونة للصخر المشيد منه الأثر الحجري، أما في حالة فقد التوازن بين حالة الأثر والبيئة المحيطة فيجب اتباع الطرق الرطبة المكملة لعمليات الإزالة الجافة حيث يمكن استخلاص الأملاح من الطبقات تحت السطحية أو المترسبة علي مسافات بعيدة داخل البنية الأساسية لتركيب الحجر، وتوجد العديد من الطرق المستخدمة في عمليات استخلاص الأملاح من الأثار الحجرية:

* إزالة الأملاح بالكمادات : **Removal Of Salts By poultices**

وتزال الأملاح بهذه الطريقة معتمدة علي خاصية الأمتصاص العالية لمادة الكمادة، واستخدام الكمادة الماصة تزيد من الأتصال بين سطح الحجر والماء وتستخدم المواد الليفية كمكونات صلبة للكمادة مثل عجينة الورق، مناديل الورق، عجينة الخشب، بعض الطفلات مثل السيبوليت Sepoilite والأتابولجيت Attapolgite ويستخدم الماء لترطيب المواد الممتصة وهو يستخدم في إزالة الأملاح القابلة للنوبان بدون خطورة علي تلف

الحجر، وقد ترطب الكمادة بكيماويات أخرى مثل المذيبات العضوية المخفضة للشد السطحي التي تساعد علي إزالة المواد الغير قابلة للذوبان من سطح الحجر، وقد تستخدم طفلة البنتونيت Bontonite والتي لاتسبب مشاكل صحية للقائمين علي العمل علي عكس الأتابولجيت والذي عد بواسطة Environmental Protection Agency (EPA) كمادة مسببة للسرطان والبنتونيت تطبق بإستخدام الفرر وقد يستخدم أكثر من تطبيق لها للحصول علي نتيجة مرضية ويتم تطبيق الكمادة في صورة محلول لباني قليل اللزوجة عن طريق وضع طبقات من الطفلات على سطح الأحجار وتكرر هذه العملية وتغطي الكمادة بطبقة من البولي إثيلين، كما قد تستخدم عجينة Mora والتي سبق ذكرها وبعد عملية الرفع وإزالة الكمادة يتم غسيل السطح بالماء النظيف ومميزات هذه الأنظمة أنها آمنة كيميائيا.

* العلاج بالإستخلاص **Treatment With Render**

إذا لم تأتي طريقة الكمادة بالغرض المطلوب في إزالة الكمية الزائدة من الأملاح تستعمل طريقة الإستخلاص المسامية إلى السطح مما ينتج عنها تبخر الرطوبة ومعها الأملاح وتتكون مواد الأستخلاص من جزء واحد من الجير إلي أربعة أجزاء من الرمل الناعم وتضاف بسمك ١٢ مللي وتنتقل الأملاح إليها، وإستخدام طبقة واحدة منها تكون غير كافية لذلك تحتاج إلى معالجات متكررة حيث تزال الطبقة الأولي ويتم بلل السطح وإضافة الطبقة الثانية وتعتبر هذه الطريقة من الطرق البطيئة لإزالة الأملاح وربما تحتاج إلي عدة شهور معتمدة علي منسوب الأملاح وكمية البخر ولكنها تعتبر غير مكلفة وسهلة التطبيق.

- طريقة أستخلاص الأملاح بالتحليل الكهربي

Extraction of Salts by Electrolysis

ويعتمد أساسها العلمي علي العمليات الكهروكيميائية التي تتم داخل بنية الحجر وطبقا لخاصية الجذب الكهربي حيث تتجه الأيونات الموجبة تجاه القطب السالب والأيونات السالبة تجاه القطب الموجب إلا أن هذه الطريقــة لا ينصــح بإستخدامها وذلك لخطورتها على الآثار الحجرية لما تسببه من حامضية المحلول بالقرب من القطب الموجب وقاعدية المحلول بالقرب من القطب السالب، عــدم فاعليتها في خفض تركيز الأملاح من منتصف المنطقة الواقعة بين الأقطــاب، استخلاصها السريع للمركبات الملحية والتي ربما تمثل المادة الرابطة لحبيبــات المعادن المكونة للصخر مؤدية إلي انهيار الأثر.

إلا أن فريز قام بتطبيق هذه الطريقة بنجاح بعد تطويرها حيــث عــدل القطب الموجب في شكل قضيب مجوف بعد أن كان مصمت ثم أتصل بنهايــة أنبوبة غير منفذة للمحاليل تقوم بتجميع المحلول الملحــي المتميــئ الــذي تــم استخلاصه من الأثر الحجري وصبه في وعاء مخصص لذلك كما غطيت هــذه الأقطاب بمخلوط صلب من هيدروكسيد وكربونات الكالسيوم ووضــع القطــب السالب في الأرض المحيطة بالأثر وعند غلق الدائرة تتحرك الأيونات الموجبة تجاه القطب السالب المتصل بالأرض حيث تنتشر في التربــة بينمــا تتحــرك الأيونات السالبة تجاه القطب الموجب وينتج عن تفاعلها مــع معــدن القطــب الموجب أو مع الطبقة المغطي بها السوائل المتميأة (هيدرات السوائل) عند معدل رطوبة أعلى من ٤٠% وتتجمع هذه السوائل المتميأة في الوعاء المخصص لها من خلال الأنبوبة غير المنفذة والموضوعة بشكل منحدر يخدم نزح هذه السوائل خارج الجسم الحجري.

د- علاج التلف البيولوجي : Treatment Of Biodeterioration

نظرا لأن التلف البيولوجي للآثار الحجرية يؤثر علي الناحية الجمالية حيث يؤدي إلي تشويه مظهرها علاوة علي فقدان الأثار الحجرية متانتها وتماسكها، ولعلاج التلف البيولوجي والسيطرة عليه يجب دراسة أسباب مهاجمة الكائنات الحية الدقيقة للأحجار والعوامل المختلفة التي تؤثر علي نموها؛ وقبل إزالة مظاهر التلف البيولوجي يجب القضاء علي أسبابه والكائنات الحية الدقيقة المسببة له ويتم ذلك بالطرق الآتية:-

(١) الطرق الغير مباشرة: Indirect Methods

وذلك عن طريق تحويل البيئة المحيطة بالأثر الحجري إلى بيئة غير مساعدة لنمو الكائنات الحية الدقيقة وذلك بالتحكم في درجة الحرارة والرطوبة والمواد الغذائية والضوء وهذه العوامل ممكن السيطرة عليها في المتاحف والمخازن، أما في البيئات المفتوحة فمن الصعب التحكم فيها ولكن هذا لا يمنع من تخفيف حدتها وذلك عن طريق عمل مظلات فوق الأثار المكشوفة لمنع تعرضها للبلل عن طريق المطر وعمل عزل الأسطح عن الأرضية وذلك بمنع تسرب المياه الأرضية عليها بالإضافة إلي العناية بتنظيفها بصفة دورية وإزالة المواد الغذائية التي قد تترسب عليها وتكون بيئة مناسبة لنمو الكائنات الحية الدقيقة.

(٢) الطرق المباشرة : Direct Methods

وهذه الطرق تعمل علي إبادة الكائنات الحية الدقيقة وهي مفيدة لأوقات معينة ولكن إذا كانت الظروف البيئية مساعدة للنمو فإن مميزات العلاج السابق تفقد سريعا وهذه الطرق تشتمل علي:

أ. الطرق الميكانيكية : Mechanical Methods

وتهدف هذه الطرق إلي أزالة القشور ذات الأصل البيولوجي والتركيب النباتي، ويستخدم لذلك مختلف أنواع الفرر والفرش الخشنة والناعمة، وقبل الإزالة يضاف محلول قلوي (٥% من الأمونيا) والذي ينفش وينعم الثالوث ويسهل عملية الإزالة.

ب. الطرق الفيزيائية : Physical Methods

وعامة تستخدم الإشعاعات الإلكترومغناطيسية، الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء، أشعة جاما والموجات القصيرة وذلك لأستخدامهم في التعقيم وإبادة الكائنات الحية الدقيقة كما يمكن استخدام المجالات الكهرومغناطيسية ذات التردد العالي.

وقد تبلورت الدراسات العديدة التي تناولت هذا الموضوع في نظريتين يفسران الدور الذي تلعبه في إبادة الكائنات الحية الدقيقة حيث يرى أصحاب النظرية الأولي أن الحرارة الناتجة عن التيارات الكهرومغناطيسية ذات التردد العالي هي العامل الأساسي في إبادة الكائنات الحية الدقيقة بينما يرى أصحاب النظرية الثانية أن تردد التيارات الكهرومغاطيسية وطول موجاتها هي العامل الأساسي في إبادة الكائنات الحية الدقيقة أما الحرارة الناتجة عنها فتلعب دورا ثانويا وقد أجريت دراسات عديدة أنتهت جميعها إلى امكانية استخدامها في التعقيم وإبادة الفطريات وغيرها من الكائنات الحية الدقيقة.

(٣) الطرق الكيميائية: Chemical Methods

وتعتبر هذه الطرق من الطرق الشائعة للقضاء على الكائنات الحية الدقيقة وذلك لسرعة تأثيرها وبقاء فاعليتها فترة من الوقت بعد المعاملة وسهولة

تنفيذها وتعتمد هذه الطرق علي المبيدات والتي يجب أن يتوفر فيها الأعتبارات الآتية:-

- الفاعلية الكافية لأكبر مساحة من التلف البيولوجي وبأقل جرعة ممكنـــة و بأقل تركيز.
- لا تتفاعل مكوناتها مع مادة الأثر الحجري.
- أن يكون قليل السمية أو عديمة للأنسان.
- أن يكون عديم اللون لا يؤثر في لون الأثر ولا يتأثر بالظروف المحيطة.
- ثابت لا يتحلل بسرعة وذات درجة صلاحية مع طول مدة الفاعليـــة فـــي الإبادة.
- سهل التسرب داخل مسام الأثر وأن يكون قادر علي الألتصاق لسطح الأثر فترة طويلة لكي يمنع الحشرات من مهاجمة الأثر.

وقد أجريت العديد من التجارب التطبيقية علي عدد من المبيدات مختلفة التركيب الكيميائي لأختبار مدى تثبيطها للنمو الميكروبي وقـــد أوصـــت هـــذه الدراسات بإستخدام المواد الأتية:

لمهاجمة الفطريات والبكتريا يمكن إستخدام تركيبه من

Povidone – Iodine 7% , Dichloroxylenol 1.22%

كما يمكن إستخدام المواد الأتية:

Megral s 97 , Megral Hs 21
Preventol R 50 , Metatin 85 -

كما يمكن إستخدام مادة

Algophase , Dithan M 45

في القضاء علي الفطريات والبكتريا

أما بالنسبة للأشنة والطحالب فقد وجد أن أفضل طرق لإزالتها هـــي إســـتخدام مركبات الأمونيوم الرباعية المعروفة بإسم quats المستخدمة مع

Tri – n – Butyl – Tinoxide (T B T O) .

كما تستخدم المبيدات الأتية لمكافحة الصراصير.

ديازنون Diazinon ,.., 5% ، ملاثيون Malathion 3% ، رونل Rannel 2%

* طرق مكافحة النمل الأبيض:

– تنظيف المكان من بقايا البناء والقش والتبن وبقايا الأخشاب لأنها تحتوي علي السليولوز الذي يعتبر غذاءا مفضلا للنمل الأبيض.

– ضرورة معالجة الأخشاب الموجودة بالأماكن الأثرية بإحدى المبيدات التـــي تقضي علي النمل مثل الكريوزون وغيرها من المواد الكيميائية الحديثة.

– إزالة جميع السراديب والأنفاق في الأماكن المصابة ويجب تتبع خنادق النمل الأبيض التي تضعها في أرضيات المباني الأثرية والقضـــاء عليهـــا بالوســـائل العلمية وذلك بإزالتها أو تغيير طبقات التربة كلما أمكن أو حقن هـــذه الطبقـــات بالمبيدات القاتلة للنمل الأبيض.

* طرق مكافحة النموات النباتية والشجيرات:

– الإزالة الميكانيكية

يتم التعامل مع هذه النباتات والشجيرات الكبيرة بإســـتخدام اليـــد وبعـــض الأدوات الملائمة لإزالتها نهائيا من جذورها في الأماكن المتسعة أو إزالة أجزاء منها بإستخدام المشارط والأدوات الملائمة عند تواجدها في أجزاء ضيقة.

- الإزالة الكيميائية

وهي الخطوة الثانية التي يتم من خلالها معالجة بقايا هذه النباتات كيميائيا بإيقاف نموها نهائيا بإستخدام بعض المواد والمضادات السامة بنسب تركيز صغيرة مثل:

الفورمالدهيد مع الماء بنسبة ٥% ، الفوراثيوم ٢%

ثم تتم إزالة البقع الناتجة والمسماه ببقع الجذور بإستخدام بعض المواد أهمها الهيكسان – الطولوين – النافثان – الماء والأمونيا.

طرق تنظيف التلف البيولوجي:

Cleaning Methods Of Biodeterioration

وهذه الطرق تستخدم لإزالة التركيبات البيولوجية والمصادر الغذائية التي تساعد علي نمو الكائنات الحية الدقيقة ولإزالة القشرة ذات الأصل الكيميائي والبيولوجي تستخدم أنواع الفرش الخشنة والناعمة والفرر لإزالة طبقات النمو وكذلك تستخدم الكمادات الماصة وبعض الطفلات مثل السيبوليت والاتابولوجيت Sepolite & Attapolgite .

كذلك يمكن استخدام الكمادات الجيلاتينية Gelatineous Poultice مثل AB57 واستخدام الأنشطة الحكاكة، كما يمكن أيضا استخدام الليزر في تنظيف السطح في المعمل، واستخدام الكائنات الحية الدقيقة المختزلة للكبريت وبخاصة (*Dsulfovibrio* , *Desulfuricans*) وذلك لإزالة القشرة الصلبة من كبريتات الكالسيوم.

ويستخدم محلول الصابون مع إضافة بعض المحاليل المائية الآتية لزيادة قوته في تنظيف مخلفات نمو العفن والموس والطحالب:-

- Aqueous Sodium Pentachlorophenate (1/100 liquid).

- Aqueous Sodium Salicylate (1/100).
- Aqueous Zinc or Magnesium Silico Fluoride (4/100).
- Aqueous Formaldehyde (5/100).

ويجب إضافة العامل المعقم بعناية والذي يضاف إلي محلول الغسيل، وقد تكون الصبغات الناتجة عن النمو الفطري صعبة وغير ممكنة الأزالة لذا يمكن استخدام عامل مبيض فقط لمحلول ضعيف جدا وهو الكلورامين ت حوالي ٢% والذي يشطف تماما بعد استعماله وإذا قاومت الصبغة هذا العلاج تعرض للهواء وضوء الشمس الذي يمكن أن يزيلها ويساعد علي ذلك إذا كانت ذات طبيعة تبخيرية ، وهناك خطوة هامة يجب اتباعها بعد استعمال الكلورامين ت هي استخدام محلول فوق أكسيد الهيدروجين مع قطرة أو أثنين من الأمونيا ثم تغسل بعد العلاج بالماء، أما صبغات العفن فيمكن إزالتها بتقشرها بفيلم بلاستيكي وهذه الطريقة مطورة من خلال إزالة الحفريات من الفحم وذلك من خلال فيلم لزج من النتروسيلولوز والتركيبة التي تعد للجفاف السريع تتركب من ميثانول ١ جم، ايثير ١ جم، زيت الكتان ، جليفاتون ٢ جم، اسيتون ٥٠ جم ، واستيات الأميل ٢% بالحجم.

رابعا : إزالة الصبغات : Removel Of Stains

١. صبغات الألوان الزيتية:

وتزال الألوان الزيتية بقشط الطبقات الخارجية السطحية بواسطة المشرط والبقايا ممكن إزالتها بخليط من ٣ : ١ من ميثانول وتراي ايثيل أو البريدين أو الموفولين أو حتى شمع الكاربو (بولي ايثيلين جليكول Ploy Ethylene Glycol).

٢. صبغات القار البيتومينية :

وهي تستجيب للعلاج بخليط مـــن ١:١:١ مـــن البنـــزين والأمونيـــا (٠,٨٨) والميثانول والتي تضاف بواسطة فرشاة استنسل ثم تغسل المنطقة بعد ذلك بالماء النقي وذلك بواسطة قطعة قماش قطنية.

٣. إزالة صبغات النحاس **Removal of Cuprous Stains**

يمكن إزالة صبغات النحاس من علي الحجر عن طريق اتباع الطريقة الأتية:

١) خلط علي الجاف ١ جزء من كلوريد الأمونيوم + أربعة أجـــزاء مـــن التلك أو طفل الأتابولوجيـــت أو ســـيبوليت Sepolire Attapulgite وإضافة ١٠% من محلول الماء النشادري.

٢) يبلل السطح قبل إضافة العجينة وتترك لتجف.

٣) إزالة العجينة بواسطة سكينة خشبية ثم إزالتها بماء التنظيف.

٤) يعاد وضع العجينة وإزالتها حتي تمام الأزالة .

٤. إزالة صبغات الحديد **Removal of Stains**

ولأزالة صبغات الحديد من علي الأثار الحجرية تتبع الخطوات الأتية:-

١) إضافة محلول من ١ جزء من سترات الصوديوم + ٦ أجزاء ماء إلـــي حجم مماثل من الجلسرين.

٢) إضافة طفلة الأتابولوجيت Attapolgite إلي المحلول حتى الحصـــول علي عجينة.

٣) إضافة العجينة إلي المســطح المصـــبوغ Stained Surface وتركهـــا لتجف.

٤) إزالة العجينة بواسطة سكينة خشبية وليس معدنية.

٥) إعادة وإزالة العجينة حتى إزالة الصبغة تماما.

وبالنسبة للصبغات الصعبة الإزالة تحتاج الآتي:-

١. يبلل السطح بمحلول مكون من ١ جزء من سترات الصوديوم + ٦ أجزاء ماء.

٢. إضافة عجينة الطفلة مبللة من الأتابولجيت Attapolgite وتحتوى علـــي Sodium Dithioite .

٣. إزالتها بواسطة الغسيل السطحي بكمية صغيرة من الماء.

خامسا : الطرق المستخدمة في تقوية الآثار الحجرية وطرق تطبيقها.

نظرا لتأثير عوامل التلف المختلفة علي مظهر ومتانة الآثار الحجريـــة والتي بأستمرارها تؤدي إلي ضياع الأثر الحجري كلية لذا وجب وقـــف هـــذه العمليات المتلفة وتأثيرها علي الحجر والعمل علي تقوية الحجر لمجابهـــة هـــذه العمليات، وأحيانا تسبق عملية التنظيف عملية التقوية، وذلك أذا كـــان بـــالحجر شروخ وفتحات أو مفتتا إلي حبيبات دقيقة وضعيفا لدرجة كبيرة فتجـــري لـــه عملية تقوية مبدئية وبعد الأنتهاء من عمليات التنظيف تجري عملية تقوية نهائية له وهي عملية تعطي للحجر وضعا أفضل للوقـــوف ضـــد الظـــروف البيئيـــة المتغيرة.

وتعتبر الوظيفة الهامة للمقومات Consolidants هو قدرتها وعملهـــا علي ربط حبيبات الأحجار التالفة وأن تتخلل إلي اعماق كبيرة داخل الأحجـــار التالفة حيث أن التغلغل السطحي فقط للمقويات يميل إلي ملء المسام وبالتـــالي توقف نفاديتها وهذه الظروف تؤدي إلي تراكم الأملاح والرطوبة خلف الطبقات

المعالجة مما يؤدي إلي مزيد من الانفصال للطبقات لإختلاف الخواص الحرارية للأجزاء المعالجة والغير معالجة وقد ذكر Price أن المقوى الجيد هو الذي لـه القدرة علي التغلغل في الأحجار المسامية المعرضة للتجوية علي عمق يصل إلي ٢٥ مللي.

أما توراكا Torraca فقد أقترح أن يتغلغل المقوي الحجري في الحجـر ليربط الجزء التالف بالقلب السليم، ومقدرة التغلغل تعتمد علي الخواص المختلفة للمقوى والخواص الفيزيائية للحجر وخاصة مسامية الحجر والتوزيع المسـامي والمحتوي الرطوبي، والخواص التي تحكم تغلغل المقوى تشتمل علي اللزوجـة للمحلول المقوى، الشد السطحي له، معدل التبخر ولابد أن يكون معامل تمـدده الحراري متناسبا مع معامل التمدد الحراري للحجر .

ويتوقف نجاح عملية التقوية على دراسة الأثر المراد ترميمـه دراسـة دقيقة إلي جانب دراسة خصائص المادة المستخدمة والظروف المحيطة المؤثرة على الأثر . ويجب أن يتوفر في المقوي القوي عدة مواصفات منها :-

- تميز مادة التقوية بعد الجفاف بالشفافية والتماسك مع التمتـع بقـدر مـن المرونة.
- يفضل أن تكون مقاومة للأنكماش بنسبة لا تقل عن ٨٠% حتي لا تسـبب حدوث تشوه داخلي لمادة الأثر .
- ألا تتكاثر بالماء بعد الجفاف وفي نفس الوقت تسمح بقـدر مناسـب مـن النفاذية .
- غير حساسة للتغير الضوئي والأكسدة .
- عكسية الأستخدام أي يمكن التخلص منها عند الحاجة بذلك بسهولة وبدون تعريض الأثر لأي تدهور أو تغيّر في التركيب الكيميائي .

- ألا تسبب تغيرا كبيرا في المظهر واللون الطبيعي للسطح أو لطبقات الألوان ويمكن إستخدامها بدون أن يؤدي ذلك إلي منع إستخدام مواد ترميم أخري .
- ألا تتحد كيميائيا مع الأثر بحيث تصبح جزء منه.
- أن تتميز بالنفاذية العالية ويتطلب ذلك تميزها بشد سطحي عالي ولزوجة منخفضة .
- أن تكون ذات درجة تحول زجاجي (Tg) عالية .
- أن تكون قابلة للذوبان في أكثر من مذيب عضوي .
- أن تكون ذات وزن جزيئي منخفض بقدر الإمكان إذ كلما انخفض الوزن الجزيئي كلما إنخفضت

وهناك مواد عديدة تستخدم للتقوية والتي تقسم غالبا إلي المواد غير العضوية والراتنجات الصناعية.

١- مواد التقوية غير العضوية: Inorganic Conslrdants

وتتكون أساسا من المركبات المعدنية التي لها القدرة علي التصلب نتيجة عمليات التميؤ Hydration عند خلطها بالماء مكونة هيدريد الملح ومن أمثلتها المركبات الأتية:-

سيلكات الصوديوم والبوتاسيوم Sodium and Potassium Silicates

ألومينات الصوديوم والبوتاسيوم Sodium and Potassium Aluminates

حيث تتفاعل سليكات الصوديوم Na_2SiO_3 أو سليكات البوتاسيوم K_2SiO_3 مع الماء وينتج حمض السليسيك H_2SiO_3 وهيدروكسيد الصوديوم أو البوتاسيوم

وهما من القلويات القوية وتعتبر نواتج تفاعلات التميؤ والتكاثف لحمض السيليسيك هي المسئولة عن عمليات التقوية وذلك لترسب الحمض بين مسام الحبيبات في صورة كتلة جيلاتينية، ولكن لا تفضل هذه المواد لتقوية الحجر وذلك لأنه ينتج عنها أحماض وقلويات قوية تتفاعل مع مكونات الحجر وتتلفه كذلك تتصرف كل من مركبات فلوسيليكات الزنك و الماغنسيوم.

Zince and Magnesium Fluosilicates (Mg SiF_6) Zn SiF_6

وألومينات الصوديوم و البوتاسيوم التي تقوم بنفس سلوك سليكات الصوديوم ولذلك يجب أستبعادها من تقوية الأثار الحجرية.

<u>التقوية بماء الجير (هيدروكسيد الكالسيوم):</u>

وقبل أستعمال ماء الجير لابد من أعداده إعدادا جيد بحيث يكون أكثر تركيزا وليس به أي عوالق، كما يجب عزله عن الهواء الجوي وإلا سوف يتحول إلي كربونات ولذا وجب تغطيته بورق من البولي اثيلين وتستمر عملية التطبيق به والتي قد تصل إلي ٤٠ تطبيق في عدة أيام.

وقد يكرر عدة مرات حسب العلاج علي فترات متباعدة وقد تغلق المسام لتكون طبقة رقيقة علي السطح تحول دون انتشار المحلول الجيري إلي الداخل. وتعتمد الطريقة علي تفاعل ثاني أكسيد الكربون CO_2 الجوي مع هيدروكسيد الكالسيوم (ماء الجير) حيث تترسب كربونات الكالسيوم في التركيب المسامي للأجزاء التالفة من الحجر، وعلي أية حال فإن محاولات استعمال ماء الجير كمقوى تحتاج إلي مزيد من الدراسة وهذا يرجع إلي أن ترسب كربونات الكالسيوم في الأجزاء التالفة أمر صعب من الناحية العلمية، وقد تم تقييم التقوية بماء الجير عن طريق معرفة درجة مقاومتها للإحتكاك وذلك بوضعها أمام نافورة مسدس من المواد الحكاكة بواسطة Price حيث وجد أنه لا يوجد دليل

علي أن ماء الجير قد أعطى أي أرتفاع في مقاومة الحجر للإحتكاك كما أنه قد تم تقوية كسر الحجر بواسط ماء الجير ولم يحدث للعينات التي أجري التجارب عليها أي درجة مفيدة من التقوية.

أستخدام هيدرات الباريوم : Baryta (Barium Hydrate)

وقد قدم لوين تجارب عديدة لإعادة تبلور الكالسيت بإستخدام هيدروكسيد الباريوم وألومينات الصوديوم وألومينات الكالسيوم فبالإضافة إلي إعادة التبلور فلقد حدث أن استبدلت بعض أيونات الكالسيوم بأيونات الباريوم، وفـي حالـة استخدام هيدروكسيد الباريوم تعتبر الألومينات مسهلة ومنشطة إعـادة التبلـور ولكنها لا تؤدي إلي استبدال الأيونات وعندما تكون مادة اليوريا غزيـرة فـي محلول هيدروكسيد الباريوم فأنها تتحول إلي كربونات الباريوم وتمـلأ المسـام وتطبيق هذه الطريقة في تقوية الآثار الحجرية صعب من الناحية العلمية.

٢- استخدام الراتنجات الصناعية في التقوية:

وتعمل الراتنجات الصناعية علي زيادة مقاومة الآثار الحجرية للتأثيرات الميكانيكية الناتجة عن الضغوط الناشئة من تبلور الأملاح داخل المسام بالإضافة إلي مقاومتها للظروف البيئية المحيطة، والراتنجات الصـناعية عبـارة عـن مركبات عضوية مخلقة ذات أوزان جزيئية عالية التبلمر وينتج مـن التفاعـل الكيميائي لإثنين أو أكثر من نفس جزيئات المركب الواحـد أو مـن جزيئـات مركبات مختلفة ويطلق مصطلح البلمرة، Polymerization علي التفاعل الذي يحدث للجزئ الإبتدائي المعروف بأسم المونيمر Monomer حيث يتم اتحادها مكونة سلسلة طويلة لمادة جديدة تسمي بوليمر ويجب قبل استخدام الراتنجـات الصناعية لعلاج الآثار الحجرية التعرف علي خواصها الكيميائيـة والفيزيائيـة

والحرارية وعمل تقييم لها لمعرفة مدى ملائمتها لعلاج وصيانة الآثار الحجرية وطرق تطبيقها وذلك للوصول إلي أفضل النتائج.

وفيما يلي أهم هذه الخصائص:-

١. الخواص الميكانيكية : Mechanical Properties

وهناك عدة عوامل تتحكم فيما تتميز به الراتنجات من خصائص ميكانيكية لعل أهمها الوزن الجزيئي وحرارة التحول الزجاجية (Tg) وطريقة أعدادها للإستخدام، عوامل التقادم الزمني، والتلف الكيميائي الضوئي وكذلك علي الطبيعة الكيميائية للبوليمرات، وتعتبر الصلادة من بين أهم الخصائص الميكانيكية ومصطلح الصلادة Hardness يعبر عن خصائص منها مقاومتها للخدش والثني والكسر كما يعبر عن مرونة وليونة المادة الراتنجية.

٢. الخواص البصرية: Optical Properies

أ. معامل الإنعكاس الضوئي: **Reflective Index**

وهو يعبر عن قدرة الراتنجات علي إنعكاس أو تسريب الضوء خلال الأسطح الرقيقة التي تكونها كما أنها تحدد مدىكفاءتها في العلاج فالراتنجات التي تعكس الضوء أكثر كفاءة من التي تمتص الضوء أو يتسرب من خلالها.

ويؤثر التلوث الجوي والرطوبة النسبية في الوسط المحيط علي معامل الإنعكاس الضوئي الراتنجات.

ب. اللون : **Colour**

ومعظم الراتنجات المستخدمة تعطي ألوان شفافة سواء أكانت منتجة علي هيئة سوائل أو مواد صلبة إلا أن الكثير منها يتحول إلي اللون الأصفر

غير المستحب بعد العلاج وذلك نتيجة التغير في خصائصها الفيزيائية والكيميائية لتعرضها لعوامل التلف المختلفة وقد قامت جمعية ASTMD1925 – 7 الأمريكية بقياس معامل الإصفرار Yellowness Index لمعظم الراتنجات الكيميائية وذلك علي حسب مقدرتها علي انعكاس الضوء أو تسريبه خلالها.

ج. اللمعان : Gloss

ويعبر مصطلح اللمعادن Gloss علي درجة لمعان أسطح الراتنجات عندما يسقط عليها الضوء سواء أكان طبيعيا أو صناعيا ولختلاف درجة لمعان الراتنجات المستخدمة في العلاج بعد تعرضها فترة طويلة لعوامل التلف المختلفة يحدد مدى ما حدث لهذه الراتنجات من تغيرات في خصائصها الميكانيكية والكيميائية كما يحدد أيضاً مدي كفاءتها في العلاج فالراتنجات التي تعطي أسطح شديدة اللمعان غير مستحبة كما أنها تتعرض للتلف أكثر من الأسطح قليلة اللمعان.

ونظرا لأن معظم الراتنجات الصناعية لا يكشف المنتج عن تركيبها الكيميائي كلية (الإضافات التي تحدد وتميز أنتاجه) فإن عملية تحليل هذه الراتنجات بهدف الكشف عن مكوناتها بالرغم من توفر الأجهزة الآتية، والتي لا تعطي أمكانية التعرف علي كل مكوناتها تعتبر صعبة جدا وهذه الأجهزة هي.

Infera red **Spectophotometer,** Gasliquid Chromatography, Ultravlaet **Spectrophotometer or / Mass Spectrometer.**

لذلك فهناك سلسلة من الإختبارات ممكن تنفيذها لمعرفة مناسبة المادة الراتنجية لتقوية الآثار الحجرية وهذه الإختبارات هي:

الأسترجاعية : Reversibility

والتي تختبر بعدد ملائم من المذيبات والناتج الحاصل من إذابة المــادة الصلبة بالسائلة يسمي المحلول ومن الصعب استرجاع المادة سليمة غير متغيرة وأغلب المستويات الأساسية للأسترجاعية هي رجوع الأثر إلي حالته قبل العلاج وفي حالة الراتنجات ذات الروابط المتقاطعة مثل الأبيوكسيات فلا توجد مذيبات لها ولازالة سلسلة واحدة من أخرى تكسر الروابط الكيميائية وهذا يدمر الراتنج.

كما يتم تقييم المرونة قبل وبعد التقادم وذلك بثني فيلم مصبوب للمــادة الراتنجية علي شكل دائري وأثناء المادة بدون شروخ يشير إلــي أنهــا مرنــة وتكسيرها يشير إلي أنها هشة. كما تعتبر الكرمشة Shrinkage من القياســات الهامة والتي من الصعب قياسها بواسطة استخدام الأساليب البســيطة وتحــدث عملية الكرمشة نتيجة لفقد المادنات.

التقادم الحراري : Heat Aging

وتجري عمليات التقادم الحراري وذلك للأسراع من أي تفاعلات والتي ربما تحدث عنه درجة الحرارة المحيطة ويتم ذلك بتعريض العينة لدرجة حرارة عالية لمدد معينة والخواص التي تتغير عند التقادم تكون عــادة هــي خاصــية الأسترجاعية واللون وتجرى عمليــة التقــادم الحــراري بإســتخدام الأفــران الكهربائية.

التقادم الضوئــي: Light Aging

ويمكن استخدام الضوء المرئي أو مستويات الضوء فــوق البنفســجي ويمكن أيضا أستخدام الضوء الفلورسنتي حيث تعرض العينة لمــدة ٢٤ ســاعة يوميا ومستويات الضوء العادي ١٥ لوكس أما أنبوبة الفلورسنت فتعطــي ٤٠٠ لوكس علي بعد ٣٠ سم وهذا أيضا يعجل من التقادم، يمكن تقييم التقادم الضوئي

عن طريق التغيرات اللونية وذلك بإرجاعها إلي لون قياسي، وتحدث تغيرات في خاصية الذوبانية والمرونة والوزن الجزيئي وتناقص اللزوجة للبوليمر بعد عملية التقادم الضوئي.

أساليب التقوية :-

وبعد إجراء عمليات التقادم علي الراتنجات الصناعية وتحديد أنسبها لإجراء عمليات التقوية يتم تحديد أسلوب التقوية وأغلب أساليب التقوية عن طريق التطبيق السطحي والذي يجب أن يتوفر فيه التغلغل المناسب إلي أعماق كبيرة داخل الأثر مما يؤدي إلي تلافي عمليات التقشير للطبقات المعالجة.

ويتم ذلك عن طريق خفض اللزوجة وجعل الشد السطحي للراتنج مناسبا وزيادة وقت الأتصال بين الحجر والمحلول، وهناك طرق عديدة تعتمد علي هذه الفكرة المقترحة من Marchesini حيث يسمح للمحلول بالإنسياب البطئ علي سطح الحجر وذلك بوضع فرشاة أو قماش قطني علي السطح حيث يغذي ببطء من خلال محتوى للمحلول وتغطي الفرشاة بغطاء بلاستيكي للإقلال من تبخر المذيب.

وقد شرح Wihr نظام الرش المستمر حيث يجمع المحلول الزائد الذي لم يمتصه الحجر ويعاد ثانية حيث يمكن الحصول علي تغلغل يتراوح من ٠،٥ – ٥سم / ساعة معتمدة علي مسامية الحجر، وتتم عملية التقوية أيضا عن طريق الغمر الكلي للأثر الحجري في محلول المادة المقوية، ونظرا لتأثر الراتنجات بالوزن الجزيئ حيث تصبح الراتنجات أقل ذوبانية في مذيبات معينة عند زيادة الوزن الجزيئي وهذه الذوبانية القليلة قد تسبب بعض المشاكل عند إجراء تطبيق محاليل التقوية علي الآثار الحجرية ولذلك تستخدم المذيبات القوية الأقل تطايرا مع التركيزات العالية، كما تستخدم المذيبات العالية درجة الغليان، وفيما يلي

سوف يتم توضيح وإبراز بعض الراتنجات الصناعية المستخدمة في تقوية الآثار الحجرية:

- **خلات الفينيل المبلمرة : Polyvinyl Acetate**

وهي عبارة عن سلاسل جزيئية تتكون من وحدات، وتعطـــي خـــلات الفينيل المبلمرة ثبات جيد للضوء والتعرض الشـــديد لـــه لا يســـبب إصـــفرارا لأفلامها ويمكن إذابتها في التولوين والمذيبات الأروماتية والأستيرات والكيتونات ولا يتأثر نسبيا بالهيدروكربونات الأليفاتية.

أما خواصها الميكانيكية فهي تعطي أفلاما ناعمة ويمكن إعداد هذا النوع من الخلات بواسطة عدة طرق من البلمرة سواء علي هيئة محاليل Solution أو معلقات Suspensions أو مســـتحلبات Emulsions كمـــا أنهـــا تختلـــف بإختلاف وزنها الجزيئي، وعند إضافة الماء إلى هذه الخلات فإنها تتحول إلـــى خلات منتفشة وتعطي سطحا أبيضا معتما وقد ذكر David 1970 أن خـــلات الفينيل المبلمرة تستخدم في علاج وصيانة الأحجار نتيجة لصغر جزيئاتها والتي يمكن إذابتها في المذيبات العضوية.

- **التقوية بإستخدام الأكريلات : Acrylates for Conservation**

وقد ذكر Luskin عام ١٩٧٠ أن معظم البلمرات الأكريلية المستخدمة تصنع من عائلتين شهيرتين من عائلات الجزيئات الأكريليه عائلة الأكـــريلات والتي اشتقت من حمـــض الأكريليـــك Acrylic acid وعائلـــة الميثـــاكريلات Methacrylates والتي اشتقت من حمض الميثاكريليك Methacrlic acid .

وتعتبر درجة حرارة تصلب بوليمر الميثاكريلات أكثر ارتفاعـــا مـــن درجة حرارة تصلب الأكريلات وقد ثبت أيضا أن بلمرات الميثـــاكريلات ذات

الوزن الجزيئي العالي لا تتحمل تأثير الأشعة فوق البنفسجية إذ يحدث لسلاسلها تكسير عرضي أثناء ميكانيكية الأكسدة.

وقد طالب Domaslowski بالاختيار الأمثل للمذيب والبوليمر وعلى سبيل المثال فإن محلول ١٠% من بولي ميثيل ميثا أكريلات في الكحول الأبيض يعطي أفضل النتائج، ويمكن إذابة الأكريلات في الهيدروكربونات الأروماتية مثل التولوين وهي تعطي أفلاما صلبة صافية زجاجية.

ومن بوليمرات الأكريليك الشائعة الأستعمال الإستخدام في تقوية الأثار الحجرية البارالويد Paraloid وهو عبارة عن Copolymer يتكون من مونيمرين وهما Methylmethacrylate, Ethylacrylate ويعتبر البارالون من أكثر الراتنجات ثباتا عند التعرض لجرعات كبيرة من الأشعة فوق البنفسيجية كما قد يستخدم البولي مثيل ميتاكريلات والذي يذاب في الزايلين أو خليط من المذيبات التي تتكون من ٨ أجزاء تولوين + ٢ جزء من الكحول المثيلي والمحلول التجاري يسمى بيداكريل ١٢٢ X وتركيزه يكون ٤% في الزايلين كما يمكن استخدام بولي بيوتيل ميثاكريلك (Lucite 2046) والذي يذاب في الكحول الأبيض المحتوى على ٣٠% من البترول أو التربنتين.

- استخدام المونيمرات في التقوية : **Monomers for Conservation**

وهناك العديد من الطرق التي أجريت على تقوية المواد المسامية بواسطة غمرها في المونيمرات مع عمل حاجز يحول دون تبخر المونيمرات وأحسن النتائج التي حصل عليها عن طريق استبقاء بواقي ميثيل ميثاكريلات.

وقد استخدم خليط المونيمرات بإتباع البلمرة بأشعة جاما أو بإتباع البلمرة الحرارية وقد استخدم مونيمر ميثيل ميثاكريلات وأثيل أكريلات حيث بلمر خليطهما أولا في أنبوبة إختبار بجرعات الأشعاع وبعد الأشعاع بأشعة

جاما تمت البلمرة ثم وضع خليط المونيمرات علي العينة وتغطيتها بصفائح الألومنيوم لإيقاف التبخر أثناء الأنتقال ثم تعريضها للإشعاع حيث عرضت لجرعة أشعاع قدرتها 3 Mard من أشعة جاما.

كما إستخدام خليط المونيمرات من للبلمرة الحرارية . حيث تم وضع ذلك الخليط في فرن عند ٥٠°م وقد فقدت كمية من المونيمرات في هذه البلمرة أكثر من بلمرة الأشعاع إلا أن بلمرة الأشعاع تحدث تقليص كبيرة للمونيمر مما يؤدي إلي وجود شروخ أكثر من البلمرة الحرارية إلا أن هذه الطرق تعتبر غير مسترجعة ولا تنفذ إلا في الحالات الضرورية .

وتستخدم بوليمرات الآكريلك لحماية وتقوية قشور الحجر ولا تحدث أي تغيرات في مظهر الحجر، وبالرغم من هذه المميزات إلا أن استخدام المونيمرات في التقوية يحتاج إلي مزيد من الدراسة وذلك لأن الحرارة التابعة لعملية تفاعلات البلمرة ربما تسبب ضغط ميكانيكي داخل الحجر والذي يكون في بعض الحالات من الكفاية بحيث يدمر المادة وهذه المخاطرة ممكن اقلالها وذلك بتخفيف المونيمر في المسام وذلك للإقلال من التأثير الحراري إلا أنه يجب قبل البدء في لتقوية بالمونيمرات أجراء الإختبارات المختلفة لمعرفة مدى موائمتها للعلاج .

- <u>استخدام مركبات السيلان في التقوية :</u>

والمادة الأساسية في هذا الفرع من الكيمياء هو Silicon Tetrahydried وتسمي بصفة شائعة السيلان Silane وجزئي السيلان يعبر عنه:

$$H - \underset{H}{\overset{H}{Si}} - H$$

وعند استبدال ذرة هيدروجين بواسطة الميثيل تسمي المادة الجديدة ميثيل سيلان أما السيلوكسانات Siloxanes فهي المواد ذات الجزيئات المحتوى علي مجوعة ذرات – Si – O – Si – وعند استبدال بعض ذرات هيدروجين فيها بواسطة راديكال يحتوى علي ذرات الكربون مثل راديكال الميثيل فـإن المـادة تعرف Organo Siloxanes ، وعندما يكون بعض الراديكالات تحتوى علـي ذرات الكربون Siloxane تكون راديكـالات مثـل Methoxy (CH_3O-) والتي تسمح بالترابط المتقاطع لسلسلة Organo – Siloxane فإن النتيجة لهذا الترابط المتقاطع تعرف باسم Polyograno – Siloxane ومن أهم – مركبات السيلان التي تستخدم في التقوية و الصيانة للآثار الحجرية:–

أ. سليكات الإيثيل : Ethyl Siloxanes

يوجد العديد من سليكات الإيثيل ولكن الوحيدة التي تستخدم ولها أهميـة في صيانة الأحجار تسمي سليكات الأثيل وتركيبها الكيمائي..

$$R-O-\underset{\underset{R}{|}}{\underset{O}{|}}{\overset{\overset{R}{|}}{\overset{O}{|}}{Si}}-O-R \qquad \text{Where } R = H-\underset{H}{\overset{H}{C}}-\underset{H}{\overset{H}{C}}-$$

وعند تميؤها تعطي Tetra hydroxyl Silane والكحول الإيثيلي وعند تفاعل جزيئات Tetra hydroxyl silane مـــع جزيئـــات Tetra ethoxyl silane المتبقية حيث تستمر هذه العملية حتى يتحول كل الكربون الموجود إلي كحـــول وعند هذا الوقت فإن ذرات الأكسجين والسيليكون سوف تكون بنسبة ٢:١ مكونا التركيب الشبكي الكامل وهذه السيلكا هي المكون الرئيسي للحجر الرملي.

وفي المراحل المتوسطة من هذه العملية عندما يتكون المنـــتج الصـــلب المعروف بإسم السليكاجيل فإن عدد من جزيئات الماء تتعلق فيزيائيا في شـــبكة السيلكون – أكسجين ويحصل علي نفس المنتج الصلب ولإختلاف معامل التمدد الحراري بين السليكا والكالسيت المكون الرئيسي للأحجار الجيرية، لذلك فـــإن سيليكات الأيثيل أكثر ملاءمة لتقوية الحجر الرملي أكثر من الأحجار الجيريـــة. ومجموعات الألكيل المرتبطة بذرة السليكون تعطي الخاصية الغير محبة للمـــاء Hydrophobicity ولذلك تتصرف السليكونات كعوامل طاردة للماء ولا تسمح بتغلغله داخل الحجر والحجر يبقي متنفسا حيث يبقي منفذا لبخـــار المـــاء دون السماح للماء السائل أن يمر خلاله وتبقي الأسطح الخارجية بدون تغيـــر فـــي خصائصها.

ب. ALKY – Triatkoxy – Silanes

ومنه Methyl – Trimelhoxy Silane والذي تركيبه كالأتي:-

```
              H
              |
      H -H-   C  -H
      |       |
H  -  C - O - Si - O - C - H
      |       |    |
      H       O    H
              |
          H - C
              |
              H
```

ويكون المنـــتج الرئيســـي هـــو Trihydroxy Silane بعـــد بلمـــرة الجزئ السابق وبعد البلمرة الكاملة فإن نسبة الذرات في البوليمر سوف تكـــون C :H :Si: O :2 :6 :2 :3 وبعد تفاعل Methyl Trimtlhoxy silane مـــع الماء تتكون شبكة من ذرات الأوكسجين والسليكون.

وأيا كان فإن كل ذرة أكسجين تملك راديكال ميثيل ترتبط بـــه أو ثـــلاث ذرات اكسجين فقط وذلك لأن وجود راديكالات الميثيل سوف تملك خاصـــية الطـــرد للماء ومادة بهذه الخاصية يمكنها التغلغل إلى أعماق كافية وبتركيز كافي وفـــي التجارب التي أجراها Charola فقد وجد أن بلمرة MNTMOS تتجمد إلـــي صلب مطاطي في حوالي ٥ أيام عند ١٠٠% رطوبة نسبية وفي ٧ – ١٢ يوم عند ٧٥% – ٣٣% رطوبة نسبية وفي ٩٠ يوم عند ١١% رطوبة نسبية وقـــد أوضحت العينات عند ١٠٠% (رطوبة نسبية) شروخ شاملة أمـــا عنـــد ٧٥% (رطوبة نسبية) فقد أوضحت شروخا صغيرة وكانت أقل وضوحا عنـــد ٥٢% رطوبة نسبية وأختفت عند ٣٣% (رطوبة نسبية) وتتبلمر العينات عنـــد ١١% (رطوبة نسبية) بطريقة جيدة، كما أشار إلي أنه يمكن تقوية الحجر التالف نظرا للقابلية الكيميائية (وجود محتوى الطفلة في الحجر).

ج . Aryl – Alkyl – Poly Siloxanes

وتشير Aryl إلي وجود راديكال حلقة الكربون مثل الفينيل -C_6H_5 ويعطي راديكال الفينيل المرونة لمنتج بلمرة السيلان كما أنه يمنح الذوبانية للبوليمر للمذيبات العضوية مثل الزايلين أو التولوين ويضاف إلي الآثار بتركيز مناسب ولكن علي الرغم من ذلك فإن كفاءتها أقل من أنظمة التقوية الطاردة للماء والتي تعتمد علي عدم بلمرة السيلان مبدئيا بدون إضافة المذيب وقد استخدم Marchesini محلول من – Polyphenyl Methyl Siloxane لتقوية واجهة تراكوتا في كاتدرائية S.Maria, .

وتعتبر من أفضل الطرق لمقاومة عمليات رشح الماء خلال الآثار الحجرية، وعلاج الأحجار وتقويتها بالسيلان يزيد من مقاومتها وحمايتها وذلك لأنه طارد للماء كما أنه يمنع الماء الداخلي من الهجرة كما أنه يزيد من مقاومة الحجر للصقيع كما أنها لا تميل لإلتقاط الأتربة ولا يحدث لها تغير لونى إلا أن لها بعض العيوب حيث تؤدي عمليات حركة الأملاح خلف الجزء المعالج التي تولد ضغط قاص يؤدي إلي سقوط الطبقة المعالجة وعلي ذلك فالعلاج بمركبات السيلان يحتاج إلي مزيد من الدراسة.

- <u>التقوية براتنجات الأيبوكسي</u> : **Epoxy Resins**

وراتنجات الأيبوكسي تعتبر سوائل لزجة (ثرموسيتنج) أو مواد صلبة ويحتوي جزئ الأيبوكسي علي مجموعة الأيبوكسي النشطة – ويحضر الراتنج من تكاثف نواتج التفاعل بين مركب Bisphenol و جزيئين من مركب Epichloro Hydrin حيث ينتج راتنج الايبوكسي الذي يتألف من عدد كبير من جزيئات المركب Diyglycidyl Ether of Bisphenol A .

وهذه البوليمرات ذات الوزن الجزيئي المنخفض تملك مقـدرة فاعليـة عندما يستخدم معها مصلب غالبا تراي ايثيل امين Trithyl Tetramine وفي هذه الحالة تتكون راتنجات شبكية غير قابلية للأسترجاع أو غير قابلة للـذوبان وهي تتفتح وتذوب جزئيا في مذيبات عديدة: مثل : البنزين، التولوين، الزايلين، الأسيتون، ميثيل ايثيل كيتون.

وبعد التصلب تقاوم راتنجات الإيبوكسي تـأثير الأحمـاض الضـعيفة والقوية وتأثير العوامل الكيميائية الأخرى وعيوبها تكمن في مقاومتها الضعيفة للضوء وخاصة للأشعة فوق البنفسجية حيث يحدث لها غمقان ويحـدث لهـا أصفرارا علي الرغم من مقاومتها لدرجات الحرارة المنخفضـة و المرتفعـة وللماء البارد والحار ولا تلين عند درجات الحرارة المرتفعة وتجنب الأتربـة قليلا وتزداد مقاومتها الميكانيكية بمرور الوقت ويستخدم راتنج الإيبوكسي في حماية الحجر من دورات التجميد ويجب الإحتراس والعناية أثناء تطبيق راتنج الأبيوكسي حيث أن كل راتنجات الإيبوكسي تسبب التهاب الجلد ولهذا السـبب يجب استخدام قفازات لليد وقناع واقي من استنشاق الغازات الضارة.

- استخدام النايلون الذائب : Soluble Nylon

والنايلون اسم نوعي لعائلة Polyamides (النايلون ٦٦)والستة الأولي تشير إلي عدد ذرات الكربون فـي مركـب Hexa Methylene Diamine والستة الثانية تشير إلي عدد ذرات الكربون في Diacid Comp وتكون "Tg " (درجة التحول الزجاجية) للنايلون نفس درجة حرارة الغرفة عند رطوبة عادية وتقل بواسطة أمتصاص الرطوبة، والنايلون حساس للأكسدةوبخاصـة أكسـدة التحول الضوئي Photolytic Oxidation ، وهـو يعتبـر مـن راتنجـات الثرموبلاستيك والتي تقاوم المذيبات وذلك لوجود الروابط الهيدروجينيـة مـن السلاسل المجاورة وبمزيد من التفاعلات في تاظروف الحمضية يؤدي إلى تكون

روابط متقاطعة بين السلاسل والتي تؤدي إلي عدم الذوبانية الكاملة، و النايلون الذائب شكل متحول كيميائيا – Hydroxy Methyl N والـــذي ينـــتج بعـــلاج النايلون مع الفورمالدهيد، الميثانول في محلول حمض الفورميك والنايلون متاح كمسحوق أبيض والذي يذوب في الكحول الميثلي أو الإيثيلي وفـــي الكحـــول الصناعي أو في خليط من ٧٥ جزء من الكحولات مع ٣٠ جزء من الماء ويميل المحلول إلي أن يصبح جيل في درجة حرارة الغرفة والنايلون الذائب المستخدم في الترميم يعرف تجاريا بـــ Calaton C B & Calaton C A وهو يضاف بالفرشاة إلي الحجر بنسبة تركيز من (٢ – ٥%) في الكحول وفـــيلم النـــايلون الذائب له قوة شد منخفضة ومظهر مطفي جذاب ومنفذ للماء، وقد استخدم علي نطاق واسع في الماضي وقل استخدامه في السنوات الأخيـــرة لعـــدم ذوبانيتـــه وأفلامه التي تصبح هشة وتلفه في مدة قصيرة وقد نصح Dewitte بأن يستخدم النايلون الذائب عندما لا توجد أمكانيات أخرى.

سادسا: إصلاح وتجميع الأحجار المكسورة:

Repair Broken Stone Objects

وتعتبر عملية تجميع وربط الأجزاء المكسورة من الأثار الحجرية مـــن العمليات الهامة وذلك للحفاظ علي القيمة الفنيـــة والجماليـــة للأثـــر الحجـــري بالإضافة إلي الحفاظ علي متانة وقوته.

ولربط وتجميع كسرتين حجرتين مع بعضها البعض لابد من وجود مادة رابطة تعمل علي لصقهما معا والعلاقة بين المادة الرابطة (اللاصـــق) والمـــادة الصلبة (الكسر) قد فسرت تفسيرات عديدة من خلال نظريات عديدة وهي :

النظرية الميكانيكية :

التي تشترط أن يكون السطح خشن حتى يحدث تداخل بين السطوح الخشنة.

نظرية الإنتشار:

حيث ينتشر اللاصق بين السطوح مكونا روابط عبر تداخلهما مع بعضها البعض.

النظرية الفيزيوكيميائية:

حيث روابط فان درفال الثانوية بين جزيئات اللاصق والسطح حيث يحدث أمتصاص فيزيائي وكيميائي وذلك نتيجة الروابط الأيونية والتساهمية كما توجد النظرية الأكتروستاتيكية.

ولقد استخدمت قديما في تجميع ولصق الأحجار بعض المواد اللاصقة الطبيعية مثل الغراء الحيواني والذي اثبت مقدرة عالية علي وصلة قوية وإعطاء قوة لصق كبيرة إلا أنه قد ظهر به بعض العيوب التي أدت للبحث عن بدائل أخرى، ومن أهم عيوبه كمادة لصقه أنها تجذب الكائنات الحية الدقيقة التي تتغذى عليه مما يشوه العمل الفنى ويصعب من قوة الربط.

وقد استخدم أيضا بعض المواد الراتنجية الطبيعية في لصق القشور والأجزاء الصغيرة من التماثيل والنقوش الحجرية مثل القلفونية وصمغ الدامار والماستيك والساندراك، وتعرف اللواصق بأنها مواد تجهز وتخزن في صورة لدنة وتتجمد عند التطبيق وتستخدم في تجميع وربط الأجزاء الصلبة مثل الأحجار.

وقد أعطي ظهور وتطور المواد المخلقة الحديثة إمكانية التعرف علـــي العديد من أصناف اللواصق ذات الكفاءة العالية والتي تخــدم مجــال تــرميم الأعمال الفنية.

وتقسم اللواصق إلي لواصق تعتمد علي المذيبات العضوية حيث توضع علي السطح في شكل محاليل أو تعتمد علي الماء حيث توضع علي السطح في شكل مستحلبات مثل خلات الفينيل المبلمرة وأيضا لواصق تتصـــهر بـــالحرارة وأخري متفاعلة كيميائيا والتي تشتمل علي مركبين يخلطان معا قبل الأســتخدام وتعتبر الأيبوكسيات من أشهرها وهي تعطي قوة لصق عالية وهنـــاك عوامـــل كثيرة تؤثر في قوى الألتصاق منها الشد السطحي، مسامية الســطح المــرتبط ونعومته، والسمك النسبي لفيلم اللاصق، لزوجة محلول اللاصق أمـــا العوامـــل الكيميائية فمن بينهما قطبية السطح وعملية البلمرة والوزن الجزيئ للبوليمرات.

وهناك بعض الشروط التي يجب توافرها في مواد اللصق التي يمكـــن اســـتخدامها فـــي عمليـــات إعـــادة تجميـــع ألحجـــار المكســـورة مثـــل: الشفافية Transparety ، المقاومـــة الميكانيكيـــة Mechanical Resitance ومقاومة الأكســـدة Oxidation Resitance والضـــوء Light ، والتميـــؤ Hydrolysis والحرارة المعتدلة ومقاومة التلف البيولوجي.

وقبل إجراء عمليات تطبيق اللاصق لابد من تقييمه لمعرفة مدىمناسبته لأغراض تجميع وإصلاح الأثار الحجرية وذلك من خلال ثلاث خواص تستخدم لتقييم قوة ربط اللاصق وهي قوة القص Sheer Strenght قوة الشد Tensile Strenght وقوة التقشير Peel Strenght بالإضافة إلي تعيين مرونة اللاصق واختبار ذوبانيته وأخيرا فيجب أن لا يبدي اللاصق أي تغيير في لونه.

وتعتبر خلات الفينيل المبلمرة وراتنجات الاكريليك وراتنجات الابيوكسي والسيليكونات من اللواصق المستخدمة في تجميع واصلاح الأحجار حيث تضاف هذه الراتنجات إلي السطح المكسور والمراد تجميعه بواسطة الفرشاة ثم يدمج السطحان معا بعد التأكد من وضعهما الصحيح ثم يتركا حتى حدوث الشك للمادة الراتنجية، أما في حالة القطع الكبيرة فيستخدم اسافين معدنية وذلك لزيادة قوة الربط ويجب أن تكون معزوله عن الهواء وأن لا يتاكسد أو تتمدد مسببه شروخ وتلف للأثر في المستقبل ويمكن استخدام قضيب من الحديد قابل للصدأ Stainless Steal والذي يكون علي شكل دلتا كما يجب أن يكون ملائم مع الحجر من حيث السمك والثقل.

أو التثقيب يتم أولا في القطعة الكبيرة ثم يتم تحديد الثقب الثاني بواسطة الطباشير أو أي مادة أخرى ملائمة ويجب أن تجرى عملية الدمج أولا قبل التثقيب للتأكد من أن كل شئ في مكانه الصحيح.

ثم يتم البدء في التجميع بتثبيت الاسياخ وذلك بأن يجهز معجون من المادة اللاصقة + بودرة الحجر الناتجة عن التثقيب + قطرات من الاسيتون أو أي مذيب مناسب، يلي ذلك ملئ الثقب بالمعجون السابق تجهيزه ثم يثبت به السيخ الصلب، وبعد تثبيت الأسياخ في أماكنها في إحدى القطعتين يتم وضع كمية من اللاصق علي كلتا الحافتين (ويراعى أن يكون اللاصق في الجزء الأوسط من سمك الجدار للقطعة) وذلك أنه عند ضم الجزئين المراد لصقهما ينتشر اللاصق في جميع الاتجاهات، وعندما يكون اللاصق بقدر مناسب وموزع بإنتظام في المنطقة الوسطى فإنه لا يخرج عن المنطقة المراد لصقها وبالتالي لا يشوه الأثر، واخيرا يتم ضم الجزئين معا وربطهما برباط مطاط لضمان تماسكهما وعدم اختلال أو فك الرابطة.

ثم تثبت القطعتين في حوض به رمل حتى يتم اللصق، وتجمع كل كتلتين معا بنفس الطريقة السابقة ثم تضم الكتل المجمعة مع بعضها بنفس الطريقة حتى الانتهاء تماما من عملية التجميع وإعادة الشكل النهائي للأثر.

سابعا : استكمال الأجزاء الناقصة

تعتبر عمليات الاستكمال للأجزاء الحجرية الناقصة من أهم وأدق العمليات في مجال ترميم الأحجار وذلك نظرا لما تحققه هذه العمليات من استمرارية بقاء الأثر بتفاصيله المعمارية والفنية وقد كانت هذه العملية تتم في البداية طبقا للإجتهادات الشخصية قبل أن يكون لهذه العمليات قواعدها وأسسها العلمية والتي نمت وتطورت من خلال مؤتمرات علمية ومواثيق دولية اتفق عليها، والتي اتفقت فيما بينها على أن:

- الاستكمال هو أحد الوسائل الهامة لإطالة عمر الأثر الحجري أي القوة اللازمة للبقاء على المدى الزمني البعيد وإلا كان عدم الاستكمال سببا في فناء الأثر جزء بعد الآخر.
- القضاء على نقاط الضعف للأثر الحجري حيث أن الأجزاء الناقصة ربما تكون في أحد أركانه الحاملة إذا كان جدارا أو في منتصف إذا كان تمثالا.
- إعطاء الأثر الحجري قوة الاحياء التاريخي من خلال شكله الأصلي سواء هيكل الأثر أو ما يحمله من زخارف ونقوش.
- ولما كان الغرض الأساسي من ترميم الآثار الحجرية هو حمايتها والحفاظ عليها والمبدأ الواجب التقيد به هو الحفاظ على البناء وما به من فن معماري أو فنون زخرفية دون إدخال أي تعديل أو تجديد على الأثر سوف يغير من معالمه ويتعارض بالتالي مع مفهوم الأصالة كثيرا أو قليلا.

ومن هذا المفهوم برزت أمام المرممين والأثريين قضية هامة اختلفت حيالها الاراء والاتجاهات، وهي قضية ذات شقين:

الأول : وهو الاختيار ما بين ضرورة الاستكمال للاجزاء الناقصة للآثار وما بين تركها دون استكمال.

الثاني: إذا ما تكرر القيام بإستكمال الأجزاء الناقصة فكيف يتم التمييز بين الأجزاء القديمة والأجزاء المستكملة.

ومن هذا المنطلق ظهرت العديد من المدارس والاراء التي تنادى بعضها بعدم الاستكمال تماما للأثر والبعض الأخر ينادى بالإستكمال التام لعناصر الأثر، وبين هذين الرأيين أراء أخري.

وحلا لهذا التناقض في الأراء فإن عملية الاستكمال للاثار يفضل القيام بها متى كانت الأجزاء الناقصة معلومة في شكلها وتفاصيلها ومتى كان استكمال الجزء الناقص يعطي للأثر قوة الأحياء التاريخي والقوة اللازمة للبقاء على المدى الزمني الطويل وإظهار ما هو خفى للعين المجردة ويخدم في مجال الدراسات الأثرية.

أما من ناحية كيفية الاستكمال والتمييز بين الجزء المستكمل والجزء الأثري فإن الأمر يختلف هنا من كون الأثر منقول أو ثابت فكلا منهما له ما يناسبه من كيفية الاستكمال أو طريقة التمييز بين القديم والحديث.

وغالبا ما تستكمل الأجزاء الناقصة بإستخدام نفس مادة الحجر أو ما يشابهها من حيث مكوناتها المعدنية وخواصها الطبيعية بحيث تكون مادة الاستكمال المختارة متوافقة في خواصها مع المادة الأصلية للأثر.

أسس وقواعد الاستكمال للآثار الحجرية:

ولأهمية موضوع الأستكمال للأجزاء الناقصة فإن هذه الأجراءات من الضروري أن تقوم علي أسس وقواعد محددة وألا تترك علي إطلاقها، تلك القواعد التي اقرتها كثيرا من المؤتمرات العلمية والمواثيق الدولية والتي تكمن في:

- أنه لا يجوز استكمال أجزاء مفقودة دون وجود نقاط أرشادية من جسم الأثر Guide Points أو الأستناد إلي سند علمي أو تاريخي مؤكد وأن يكون ذلك بهدف صيانة الأثر والحفاظ عليه.
- يجب أن تدمج الأجزاء المستكملة بتوافق وتألف مع الأثر ولكن في نفس الوقت يجب أن تكون مميزة عن الأصل، حيث أن الترميم ليس تزييفا للشواهد الفنية والتاريخية.
- يجب التوقف عندما يبدأ التخمين: أي أن الجزء المراد استكماله لا توجد له أي نقاط أرشادية تدل علي تفاصيله أو أية وثائق أو صور أو أوصاف تاريخية.
- اعتبار كل أو معظم الأسس والقواعد التي يجب اتباعها في مجال الترميم بصفة عامة أساسا يعتد بها عند القيام بإستكمال الأحجار الأثرية الناقصة في أجزاء منها.
- وعندما يتميز الأثر بندرته وتمتعه بقيمة أثرية مميزة وعند تعذر وجود نقاط أرشادية فإنه يمكن الأعتماد علي كافة الوسائل الممكنة في إدراك حدود وتفاصيل الجزء الناقص من الأثر وخاصة الوثائق والرسوم والصور أو المصادر التاريخية أو الإستنتاج من مباني معاصرة لذلك العمل.

ونظرا لأهمية المونة بأوجه استخداماتها المختلفة ومدى الحاجة إليها في عملية الأستكمال لإصلاح العيوب تمت العديد من الدراسات للعديد من المونات والتي يراعى فيها بعض الاعتبارات كأن تكون ذات خواص ميكانيكية عالية وتتشابه مع المونة القديمة من حيث اللون والخواص والتركيب – سهلة التشكيل بدون الاحتياج إلي مهارة عالية – ومن المونات التي استخدمت في ترميم الأحجار وإرجاع طبقات التكسية استخدام مونة مكونة من جزء جير + ٢ جزء رمل + ٠,٥ جزء أسمنت أبيض + ١,٥ جزء كاولين واستخدمت هذه المونة في ترميم مقبرة غنمنتي بهضبة الجيزة.

كما استخدمت مونة مكونة من ١ جزء جير + ١ جزء رمل + ١ جزء أسمنت أبيض في ترميم مقبرة تاري بهضبة الجيزة وأستخدمت مونة مكونة ٠,١ رمل + ١ جير + ٠,٥ أسمنت ابيض في ترميم مقبرة مرس عنخ بهضبة الجيزة كما أستخدمت نفس المونة جير + رمل + أسمنت أبيض + بودرة الحجر بنسبة ١ : ٢ : ٠,٥ + مادة الأيدوبوند في ترميم الأحجار بمقبرة وب أم نفرت بهضبة الجيزة وأستخدمت مونة مكونة من جير + رمل + مادة التامكس في علاج بعض مقابر هضبة الجيزة وسقارة.

كما تمت دراسات علي مونة مكونة من جير + رمل + بودرة الكاولين المحروق في درجات حرارة عالية (أعلي من ٥٠٠م) وأوصي بإستخدامها من قبل المجلس الأعلي للأثار في ترميم الأحجار الجيرية والرملية وذكر أنه أحتاج المرمم لمونة ذات خواص فيزيائية وميكانيكية أعلي إستخدم كاولين محروق عند درجات حرارة أعلى، كما استخدمت مونة مكونة من رمل + أسمنت أبيض + مسحوق حصى الطباشير + مسحوق رمل أحمر في أستكمال حامل الأحجار الرملية بمقبرة بدعشتر بالواحات البحرية.

وقد أوصي Michele , Sergio بإستخدام مونة مكونـــة مـــن بـــودرة الرخام + الجير + مادة البريمال Ac33 في علاج الأحجار المعرضة للتلف.

كما ذكرت "Maria" أن المونة المكونة من الجير والبوزلانا والأسمنت الأبيض والرمل مع كسر الأحجار بنســبة ٣ : ١٢ : ١٨ : ٩٠ بــالوزن مـــن المونات المفضلة في استكمال الأجزاء الناقصة من النقوش والأحجار، كما يمكن استخدام كازينات الكالسيوم بنسبة ٨ أجزاء من الجير + ١ جزء مـــن الكـــازين حيث يساعد الكازين في حفظ الماء، وقد استخدمت مونة مكونـــة مـــن بـــودرة الحجر الناعم و الجير ومادة البريمال Ac33 في حقن الشقوق وأماكن انفصـــال بلوحة جدارية بهضبة الجيزة.

استخدمت مونة من الرمل + الجير+ الحيبة بنسبة ٢ : ١ : ١ مع إضافة قطرات النامكس في بعض مقابر بني حسن، ويلاحظ في حالة استكمال المناطق المفقودة في الأسطح المصورة يتعين استخدام مونة مشابهة لأرضية التصـــوير من حيث التركيب ودرجة اللون وينبغي أن يكون الهدف من عمليات الأستكمال هو علاج ما تلف بهدف الإبقاء والاستمرار لتلك الأحجار.

هذا وتنقسم عمليات الاستكمال تبعا للجزء المفقود إلى:

– **أجزاء مفقودة صغيرة.** حيث أن عمليات استكمالها تكون بسيطة الغرض منها سد الفجوات حتى لا تكون بداية لتلف أجزاء أكبر كذلك لسد الطريق أمام التلف الحشري من أن يتخذ هذه الفجوات مأوي لها وتستخدم في هذه الأجـــزاء أحـــد المونات المختارة ويراعى قبل تطبيقها رش الجدار بمحلول مائي من البريمـــال لزيادة التصاق المونة بالسطح.

- أجزاء مفقودة كبيرة: مثل الشروخ العميقة والفواصل الصخرية وأحيانا فقد أجزاء حجرية أو كتل كبيرة ويكون هنا الاستكمال علي طبيعة الأجزاء المفقودة ويستخدم فيه عدة أساليب.

- الأسلوب المصري Egyptian Style :

وتستخدم فيه مونة ضعيفة في أغلب الأحيان تستكمل بها الأجزاء المفقودة ويكون لونه أفتح من لون الأرضية المجاورة له ومستوى سطحه عادة أقل من مستوى السطح المجاور بحوالي من ٢ : ٣ مم وقد نفذ هذا الأسلوب بمقابر بني حسن وتل العمارنة بالمنيا.

- الأسلوب الإيطالي Italian Style :

وفي هذا الأسلوب تستكمل الأجزاء المفقودة بمستوى سطح الجدار نفسه مع استخدام نفس لون الأرضية مع التهشير بخطوط سوداء للدلالة علي أماكن الترميم بحيث لا يستطيع المشاهد رؤيتها من بعد ويتم أكتشافها بسهولة عن قرب واستخدم هذا الأسلوب في مقبرة نفرتاري بواسطة بعثة معهد بول جيتي الإيطالية.

- الأسلوب الإنجليزي English Style :

وفيه تستكمل الأجزاء المفقودة بمونة ذات لون أفتح مع تحديد الخطوط الخارجية للأشكال لتعطي فكرة للمشاهد عن بقية الأثر وذلك باللون الغالب للأثر وقد استخدم هذا الأسلوب في ترميم النقوش الجدارية بجزيرة الفنتين بأسوان.

وعند إجراء عمليات الإستكمال فإنه يفضل إزالة أي أثار للمونة القديمة التالفة لأنها يمكن أن تكون بؤرة للتلف بعد ذلك للمونة الجديدة المضافة كذلك يجب تنظيف السطح جيداً من أي آثار للأتربة وخلافه حتى نضمن إلتصاق تام

للمونة الجديدة المضافة للسطح، ولو وجد إصابة فطرية فإنـــه يجـــب اســـتخدام مضاد فطري للقضاء عليها أولا، كذلك يجب أن يبلل السطح قبل تطبيق المونة الجديدة حتى لا يمتص الحائط ماء هذه المونة فتتعرض للتشقق السريع والتلف، كذلك يجب أن تطبق المونة في حالة وسط مـــن اللزوجـــة مـــا بـــين الســـائلة والمتماسكة حتى لا تسيل علي السطح المحيط بها وفي حالة تطبيق المونة فـــي درجة حرارة عالية فإنه يفضل رش سطحها بعد التطبيق رشاً خفيفاً بالماء حتى يعطل عملية الجفاف السريع ويساعد عملية الكربنه.

ملء التجاويف وأماكن الربط المفتوحة :

Filling Open Joints and Gavities

والغرض من عملية ملء الفتحات والتجاويف الحصول علي سطح ناعم بدون شروخ أو فتحات للمحافظة علي القيمة الجمالية للإثر الحجري، ولملء الفتحات الواسعة تستخدم عجينة مناسبة والتي يجب أن يتوفر فيها قوة الالتصاق العالية بالحجر وأن تتوافق خصائصها الفيزيائية والميكانيكية مع الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحجر، وهي تتكون من مواد مالئة مثل الرمل أو حبيبات الزجاج أو مسحوق الحجر ويعتبر الجير والإسمنت من المواد الرابطة والتي تتميز بمقاومتها الميكانيكية الجيدة إلي حد ما وتكلفتها المنخفضة ولكن يجب تجنبهم وبخاصة في الأماكن الرطبة كما تستخدم الراتنجات الصناعية كمادة رابطة مثل مستحلبات الأكريليك و السليكونات والبولي استر ولواصق الإيبوكسي والتي تمتلك خواص ميكانيكية جيدة ولكنها أقل مقاومة للأشعة فوق البنفسجية.

المراجع العربية

- إبراهيم محمد عبد الله : علاج وصيانة الآثار الرخامية – رسالة ماجستير – كلية الآثار – قسم ترميم الآثار – جامعة القاهرة ١٩٩٦م .
- أحمد إبراهيم عطية : دراسة المونات القديمة والحديثة لتوظيفها في أعمال الترميم المعماري للمباني الأثرية في مصر – رسالة دكتوراة – كلية الآثار – جامعة القاهرة ٢٠٠٠ م .
- الفريد لوكاس : المواد والصناعات عند قدماء المصريين – ترجمة زكي إسكندر – القاهرة ١٩٤٥.
- جيمس هنري برستد : تاريخ مصر منذ أقدم العصور إلي الفتح الفارسي – ترجمة حسن كمال – وزارة المعارف ١٩٢٩ .
- عبد العزيز صالح : تاريخ الشرق الأدني القديم ، مصر القديمة – مكتبة الانجلو المصرية – القاهرة ١٩٩٠م .
- عبد العزيز صالح : مصر والشرق الأدني القديم – الجزء الأول – دار الطباعة الحديثة – القاهرة –١٩٨١ .
- عبد العزيز صالح : موسوعة الفن المصري القديم في تاريخ الحضارة المصرية – المجلد الأول – العدد ٥١٤ – المؤسسة المصرية العامة للتأليف والترجمة – القاهرة ١٩٦٢م.
- عبد الفتاح السعيد البنا : دراسة مقارنة للمواد والطرق المختلفة المستخدمة في علاج وصيانة الآثار الحجرية وتأثيرها على خواصها – ماجستير – كلية الآثار – جامعة القاهرة ١٩٩٠.
- عبد المعز شاهين : ترميم وصيانة المباني الأثرية والتاريخية – المجلس الأعلى للآثار – ١٩٩٤ .

- فخري موسي : الجيولوجيا العملية – دار المعارف – القاهرة ١٩٩٢ م.
- قدري كامل : علاج وصيانة الأحجار الجيرية الأثرية – تطبيقا على بوابة شاشانق الثاني بالمتحف المصري – ماجستير – كلية الآثار – القاهرة ١٩٧٨ .
- كاليتي – ب – د : الأشعة السينية وتطبيقاتها الهندسية – ترجمة سعيد عبد الغفار (وأخرون) – الهيئة المصرية العامة للكتاب – القاهرة ١٩٨٠.
- محمد أنور شكري : العمارة في مصر القديمة – الهيئة المصرية العامة للكتاب ١٩٧٠ م .
- محمد عبد الهادي محمد : دراسات في ترميم وصيانة الآثار غير العضوية – مكتبة زهراء الشرق – القاهرة ١٩٩٨ .
- محمد عز الدين حلمي : علم المعادن – مكتبة الانجلو المصرية – القاهرة ١٩٨١ .
- محمد فهمي عبد الوهاب : دراسات نظرية وعملية في حقل الفنون الأثرية – مطابع دار الشعب – القاهرة ١٩٧٨ م.
- محمد متولي : وجه الأرض – مكتبة الانجلو المصرية ١٩٧٢م.
- محمود توفيق سالم : أساسيات الجيولوجيا الهندسية – دار الراتب الجامعية – بيروت ١٩٨٥ .
- توراكا : تكنولوجيا المواد وصيانة المباني الأثرية – ترجمة أحمد إبراهيم عطية – دار الفجر للنشر – القاهرة ٢٠٠٣ .
- ويليام – هـ – ماثيوز – ما هي الجيولوجيا – ترجمة مختار رسمي ناشد – الهيئة المصرية العامة للكتاب – ١٩٩٥ م.

Reference

- Abbott , E.V., Taxonomic Studies on Soil Fungi , Iowa State Coll. Jour. Sci., I, 1956.
- Abd El – Hady , M., M., Acrylic Resins and Silicones as Monumental Stone. Preservatives, 2nd Arab .Int. Conf., on Materials, Sci., in Alex., Egypt, 1990.
- Alessandrini, G.et al , Conservation of Cultune Property in Italy the Problem of Technical standards, IV cong. Cuba 1998 .
- Alessandriri, G. & Toniolo, L. et al, on the Cleaning of Deteriorated stone Menirals, in (C.S.O.M) , vol. II, Rilem, London 1983.
- Amoroso , G.G. & Fassina, V., Stone Decay and Conservation, Materials Science Monograph I, EL Sevier, Amestrdam , 1983.
- Ashurat, J.Methods of Reoparing and Conslidating stone building in (C.B.D.S.) vol I.IIRilem, London, 1990.
- Ashurst J. : Cleaning masonary buiding in " Conservation of Building and Decorative Stone, London, 1990, P125 .
- Bell, F., G., el al , Preservation and Restoration of Historic Building, Two case. History, G.A.R., Win , Netherlands , 1993.
- Bethune M.G.: The use of abrasive Process for cleaning ethnological materials in : Studies in Conservation", vol. 14, 1969.
- Blaeuer, C : Weathering of Bernese Sandstone , in Vth (Inter .Cong.on deterioatin and Conervation of Stone) Vol I. Italy 1985.

- Caner,e., Denirci, S., Deterioration of Dolomite by Soluble Salts in Divrigi Great Mosque- Turkey, in Vth (inter. Cong . of Deterioration & Conservation of Stone) Vol. I Italy 1985.
- Cook, R. U. Geomorphology in Environmental Management , an introduction, London , 1988.
- Corny, J., M., The Elements of Archaeological Cons., New Feterlone, 1990 Example, Milan 1991.
- Francis , G.D : Igneous Rocks in (C.B.D.S.), vol .I, Boston , 1990.
- Lebel, M.N.,Nikitin, M.K., Application of Polyner Compositions for the Restoration of Work Made of stone, Italy 1988.
- Litt man, K. f. sasse, H.R., Development of Polymer for Consolidation of Natural stone, London 1990.
- Ordaz, J., espert, R.M., Porosity and Capillarity in Some Sand Stone and Dolomite Monumental stone, in Vth (inter. Cong .of Deterioration & Conservation of Stone) Vol. I Italy 1985
- Schanberg.,e. f. Fritsch, H.,Aqueous water Repellents Based or Silicon-organic Chemicals in Vith (Inter. cong. on Det. And cons. Of stone Torun,Italy, 1988.
- Schoonbrood, J.W.M., Low Pressure Applicatlion Technique for stone preservation in (C.S.O.M.) Vol.II, Rilem, unesco, London 1993.
- Torraca, G. Porous Building Materials Science For Architectural Conservation , ICCROM 1982.
- Weber, J., Natural and Artificial Weathering of Austrian Building Ston due to AirPollution , in Vth (inter. Cong . of Deterioration & Conservation of Stone) Vol. I Italy 1985.
- Winkler, E.M., Properties of Stone , in Stone Properties Durability in Man's Rnvironment , New York, 1973.

الفهرس